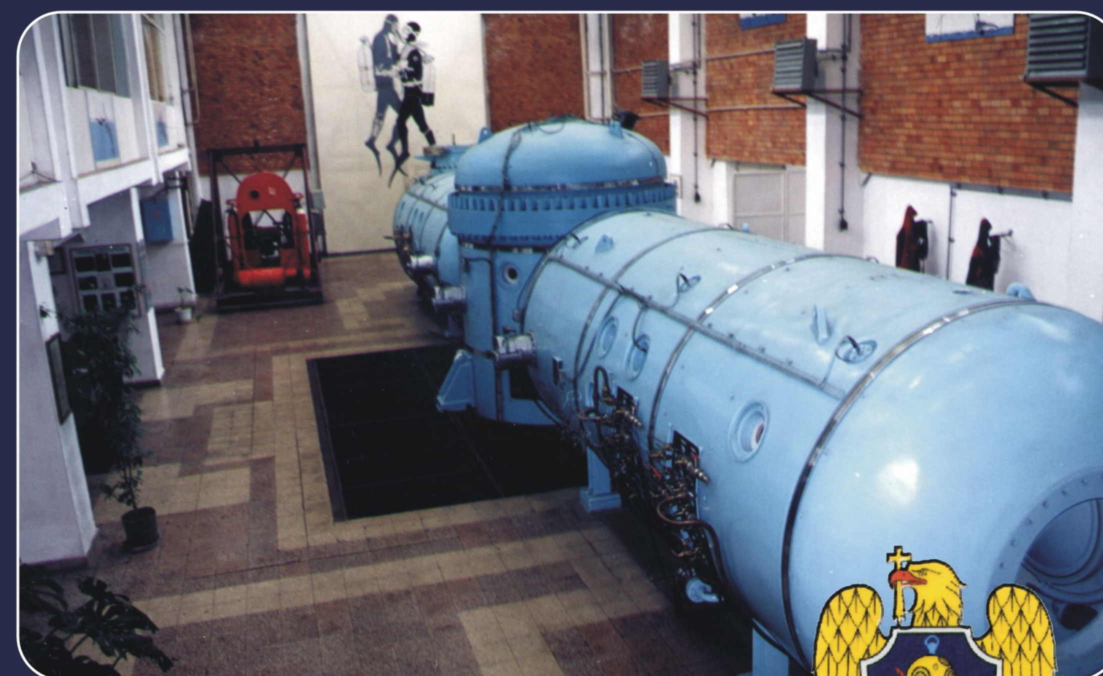
Mircea DEGERATU
Aron PETRU
Ştefan GEORGESCU
Sergiu IONIŢĂ

TEHNOLOGII HIPERBARE PENTRU SCUFUNDĂRI UNITARE ŞI ÎN SATURAŢIE





MATRIX ROM
BUCUREŞTI

TEHNOLOGII HIPERBARE PENTRU SCUFUNDĂRI UNITARE ŞI ÎN SATURAŢIE
Mircea DEGERATU Aron PETRU Ştefan GEORGESCU Sergiu IONIŢĂ

MIRCEA DEGERATU
ŞTEFAN GEORGESCU
ARON PETRU
SERGIU IONIȚĂ

TEHNOLOGII HIPERBARE PENTRU SCUFUNDĂRI UNITARE ŞI ÎN SATURAȚIE

MATRIX ROM
Bucureşti 2008

C.P. 16-162
062510 – Bucureşti
tel. 021.4113617, fax 021.4114280
e-mail: office@matrixrom.ro
www.matrixrom.ro
www.carteuniversitara.ro

Editura MATRIX ROM este acreditată de
CONSILIUL NAŢIONAL AL CERCETĂRII ŞTIINŢIFICE DIN ÎNVĂŢĂMÂNTUL SUPERIOR

Referent ştiinţific: Viceamiral (r) ing. Ilie ŞTEFAN
fost Comandant al Centrului de Scafandri Constanţa

Tehnoredactare computerizată: Gheorghe OLTEAN

Coperta: ing. Costin COŞOIU

Descrierea CIP a Bibliotecii Naţionale a României
DEGERATU, MIRCEA
Tehnologii hiperbare pentru scufundări unitare şi în saturaţie/
Mircea Degeratu, Aron Petru, Ştefan Georgescu, Sergiu Ioniţă
Bucureşti, Matrix Rom, 2008
Bibliogr.
ISBN 978-973-755-xxx-x
I. Petru, Aron
II. Georgescu, Ştefan
III. Ioniţă, Sergiu

Coperta I: Laboratorul Hiperbar din Centrul de Scafandri Constanţa

ISBN 978-973-755-xxx-x

În memoria colegului nostru
ing. Vasile BEIU

PREFAŢĂ

În ultimele decenii, nevoile operaţionale privind scufundările unitare şi în saturaţie cu scop industrial şi militar, au impus dezvoltarea cercetărilor specifice tehnologiilor hiperbare cu aplicaţii la pătrunderea şi evoluţia omului sub apă.

Cercetările din domeniul proceselor hiperbare, pornind de la relaţia dintre scafandru, instalaţie hiperbară şi presiunea hidrostatică, au un caracter interdisciplinar având la bază discipline ca mecanica fluidelor, fizica scufundării, fiziologia hiperbară şi chimia. Aceste cercetări se realizează în cadrul unor laboratoare hiperbare dotate cu sisteme de scufundare echipate cu instalaţii şi aparatură specializate. Scopul cercetărilor este acela de a elabora tehnologii hiperbare care să asigure realizarea dezideratelor specifice pătrunderii şi lucrului omului sub apă şi anume: adâncime de scufundare cât mai mare, randament al scufundării cât mai ridicat prin reducerea timpilor de compresie şi decompresie, confort fiziologic al scafandrului cât mai bun şi siguranţă maximă în timpul scufundării.

În România, cercetările din domeniul tehnologiilor hiperbare s-au efectuat, în mod organizat şi eficient, încă de la începutul anilor ’80, atunci când dotarea tehnică a permis realizarea de astfel de cercetări. Este vorba despre dotarea Centrului de Scafandri din Constanţa cu un laborator hiperbar realizat în colaborare cu firma COMEX INDUSTRIES şi care era, la vremea respectivă, de nivel tehnic mondial şi unic, ca instalaţie şi echipament, în estul Europei. Rezultatele acestor cercetări, efectuate de echipe complexe alcătuite din ingineri, medici, biologi, ofiţeri de marină, maiştrii militari, tehnicieni şi scafandri profesionişti, au fost de un înalt nivel ştiinţific fiind comparabile cu rezultatele obţinute în cadrul altor laboratoare hiperbare din ţări cu tradiţie în domeniu ca Franţa, S.U.A., Anglia etc. Aceste cercetări s-au finalizat cu elaborarea şi testarea unor tehnologii hiperbare originale pentru scufundări unitare şi în saturaţie, culminând, în anul 1984, cu scufundarea în saturaţie simulată la adâncimea de 500 m, ceea ce a situat România în rândul celor cinci ţări care atinseseră, la acea dată, această adâncime.

Cartea, organizată pe cinci capitole, îşi propune să prezinte atât elemente generale privind procesele şi tehnologiile hiperbare cât şi date concrete obţinute prin testele hiperbare efectuate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanţa pe baza unor proceduri şi tehnologii originale, unele dintre rezultatele cercetărilor fiind prezentate comparativ cu rezultatele testelor efectuate în alte centre hiperbare din lume. De asemenea, sunt prezentate şi proceduri hiperbare aplicate în cadrul unor scufundări unitare sau în saturaţie efectuate în cele mai renumite laboratoare hiperbare din lume.

Lucrarea, prin conţinutul ei tehnic şi ştiinţific, se adresează în primul rând specialiştilor din domeniul tehnologiilor hiperbare care creează proceduri şi programe de scufundare şi care conduc scufundări unitare sau în saturaţie bazate pe astfel de tehnologii. De asemenea, cartea este utilă ofiţerilor, maiştrilor militari şi personalului tehnic din cadrul laboratoarelor hiperbare şi echipelor de cercetare şi proiectare din domeniul pătrunderii omului sub apă aferente Forţelor Navale, personalului tehnic din Marina Civilă, instructorilor din cadrul şcolilor de scufundare, precum şi tuturor categoriilor de scafandri profesionişti, militari sau civili.

Autorii

CUPRINS

1.

ELEMENTE DE FIZICA SCUFUNDĂRII

Cea mai mare parte a persoanelor neinițiate în problemele de pătrundere a omului sub apă, au tendința de a-şi imagina că este suficient ca scafandrul să fie alimentat cu aer sau cu alt tip de amestec gazos respirator binar sau ternar de la suprafață sau prin intermediul unui aparat de respirat sub apă, ca el să se comporte şi să evolueze în mediul acvatic la fel ca în mediul aerian.

Situația reală este însă cu totul alta deoarece apa, datorită proprietăților sale fizice, foarte diferite de cele ale aerului, impune scafandrului o adaptare specială la acest nou mediu. Sub apă, coborârea pe verticală este însoțită de variații rapide de presiune şi de volum precum şi de variații importante de densitate, temperatură şi salinitate. De asemenea, sub apă, schimburile de căldură sunt mai intense, iar pătrunderea luminii este mai slabă. În plus, diferența mare dintre densitatea apei şi cea a aerului sau a amestecului respirator conduce la creşterea rezistenței hidrodinamice la deplasare, precum şi la încetinirea tuturor mişcărilor sub apă.

Aceste caracteristici fizice ale apei, precum şi variațiile acestora cu adâncimea, conduc la modificări importante ale parametrilor fiziologici ai organismului uman, ceea ce a făcut pe fiziologişti să considere această interacțiune dintre mediul acvatic şi organismul uman ca o "agresiune" la care scafandrul trebuie, prin echipamentul de care dispune şi prin tehnicile pe care şi le-a însuşit, să se adapteze.

În acest capitol, sunt prezentate elemente generale privind fizica scufundării, elemente care stau la baza explicării aspectelor fiziologice ale scufundării, proiectării echipamentelor de scufundare, precum şi la stabilirea tehnicilor şi tehnologiilor de pătrundere a omului sub apă.

1.1. PRESIUNEA HIDROSTATICĂ

Presiunea hidrostatică este o mărime scalară care exprimă gradul de comprimare a unui fluid aflat în repaus, într-un punct din interiorul acestuia. Presiunea hidrostatică defineşte complet starea de tensiune a fluidului din punctul respectiv.

1.1.1. UNITĂȚI DE MĂSURĂ PENTRU PRESIUNE

În sistemul internațional de unități de măsură (SI), având ca mărimi fundamentale lungimea, masa şi timpul, exprimate în, metri (m), kilograme (kg) şi respectiv secunde (s), (MKS), unitatea de măsură pentru presiune (p) este Newtonul pe metru pătrat (N/m^2), numit şi Pascal (Pa). Deci, în sistemul SI sau MKS:

$$< p >_{SI} = \mathrm{N/m^2} = \mathrm{Pa}\,.$$

În practica scufundării, unitatea de măsură uzuală pentru presiune este barul (bar):

$$1\,\text{bar} = 1\,\text{daN/cm}^2 = 10^5\ \text{N/m}^2 = 10^5\ \text{Pa},$$

$$1\ \text{bar} = 1000\ \text{mbar}.$$

Se mai păstrează obiceiul ca în hidraulica aplicată să se exprime presiunea şi în sistemul tehnic de unităţi de măsură. Acest sistem are ca mărimi fundamentale lungimea, forţa (greutatea) şi timpul exprimate în metri (m), kilograme-forţă (kgf) şi respectiv secunde (s), fiind numit şi sistemul MKfS. În sistemul MKfS, unitatea de măsură pentru presiune este kilogramul-forţă pe metru pătrat:

$$< p >_{\text{MKfS}} = \text{kgf/m}^2.$$

În practica scufundării, se mai păstrează obiceiul de a se utiliza pentru exprimarea presiunii o unitate de măsură clasică numită atmosfera (at):

$$1\,\text{at} = 1\,\text{kgf/cm}^2 = 9{,}81\,\text{N/cm}^2 = 9{,}81 \cdot 10^4\ \text{N/m}^2 = 9{,}81 \cdot 10^4\ \text{Pa}.$$

Prin urmare, în aplicaţiile practice din domeniul scufundării, se poate considera, fără a face erori semnificative, că atmosfera este egală cu barul:

$$1\,\text{at} = 9{,}81 \cdot 10^4\,\text{N/m}^2 \approx 10^5\ \text{N/m}^2 = 1\,\text{bar}.$$

Această aproximaţie, admisă în domeniul scufundării, este justificată prin nivelul de precizie al manometrelor şi profundimetrelor utilizate în acest domeniu.

1.1.2. PRESIUNEA ATMOSFERICĂ

Atmosfera reprezintă stratul de aer care înconjoară globul terestru. Atmosfera reală se împarte în două straturi numite troposfera, care se întinde de la suprafaţa pământului până la o altitudine de circa 1 km şi stratosfera. Acest strat de aer, numit atmosfera terestră, exercită la baza lui (la suprafaţa Pământului) o presiune numită *presiunea atmosferică.*

Presiunea atmosferică la nivelul mării, exprimată în scară barometrică (absolută), este de circa o atmosferă în scară absolută (1 ata). Deci:

$$(p_{\text{at}})_{\text{abs}} = 1\,\text{ata} \cong 10^5\ \text{N/m}^2 (\text{sc. abs.}) = 1\,\text{bar}\,(\text{sc. abs.}) = 1000\,\text{mbar}\,(\text{sc. abs.}).$$

În interiorul stratului atmosferic presiunea scade cu creşterea altitudinii. Această variaţie a presiunii cu altitudinea poate fi exprimată prin legea barometrică reprezentată grafic în figura 1.1.

Analizând legea de variaţie a presiunii cu altitudinea în atmosfera terestră, se observă că este necesară o urcare până la o altitudine de aproximativ 5000 m pentru ca presiunea să scadă la jumătate (de la 1 ata la 0,5 ata). Din contră, în apă, conform legii generale a hidrostaticii, este suficientă coborârea la 10 m adâncime sub suprafaţa liberă a apei pentru ca presiunea să se dubleze crescând de la 1 ata la 2 ata.

Cunoaşterea acestei scăderi a presiunii cu altitudinea este foarte importantă în stabilirea tabelelor de decompresie după scufundări în lacuri situate la altitudini mari, precum şi la stabilirea limitelor de timp şi de altitudine pentru zborul cu avionul sau elicopterul după efectuarea unei scufundări.

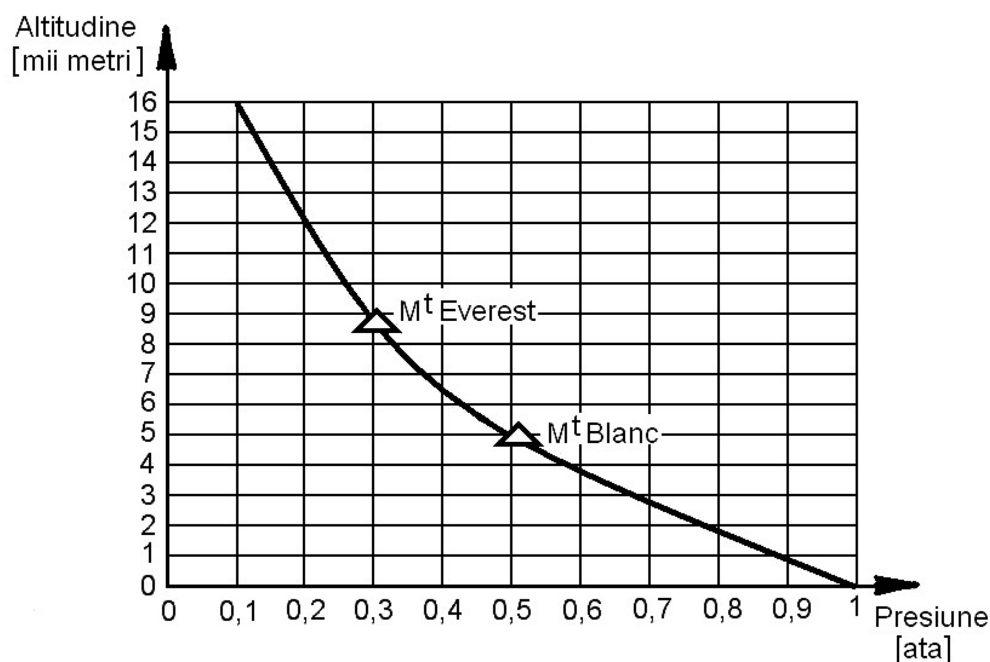


Fig. 1.1. Variația presiunii cu altitudinea.

1.1.3. SCĂRI PENTRU EXPRIMAREA PRESIUNII

Există două scări pentru exprimarea presiunii: scara relativă (manometrică) şi scara absolută (barometrică).

Scara relativă (manometrică) are ca origine (valoare zero) presiunea atmosferică (zero relativ). În această scară, presiunile mai mari ca presiunea atmosferică au valori pozitive (suprapresiuni), iar presiunile mai mici ca presiunea atmosferică au valori negative (depresiuni). În scara relativă, presiunea atmosferică este deci egală cu zero:

$$(p_{\text{at}})_{\text{rel}} = 0\,.$$

Scara absolută (barometrică) are ca origine (valoare zero) vidul absolut (zero absolut). În această scară, toate presiunile au valori pozitive. În scara absolută, presiunea atmosferică este:

$$(p_{\text{at}})_{\text{abs}} = 1 \text{ ata} \approx 1 \text{ bar}\,(\text{sc. abs.}).$$

Relația între cele două scări corespunde translației originii. Astfel, presiunea dintr-un punct din fluid exprimată în scară absolută $(p)_{\text{abs}}$ este egală cu presiunea în scară relativă $(p)_{\text{rel}}$ plus presiunea atmosferică exprimată în scară absolută $(p_{\text{at}})_{\text{abs}}$:

$$(p)_{\text{abs}} = (p)_{\text{rel}} + (p_{\text{at}})_{\text{abs}}\,. \tag{1-1}$$

Trebuie menționat faptul că, atunci când se măsoară presiunea cu ajutorul manometrului, fie că este vorba de presiunea aerului din butelie, fie că este vorba de adâncimea de imersie (măsurată cu un manometru gradat în metri numit profundimetru), presiunea va fi indicată totdeauna în scară relativă (manometrică).

Atunci când se aplică relațiile de stare ale gazelor cum ar fi legea Boyle-Mariotte, în calcule se lucrează numai cu presiuni exprimate în scară absolută.

1.1.4. VARIAȚIA PRESIUNII CU ADÂNCIMEA

Una dintre consecințele legii generale a hidrostaticii este aceea că presiunea hidrostatică (pe scurt, presiunea), creşte liniar cu adâncimea conform relației (fig. 1.2):

$$p = p_{at} + \rho g h, \tag{1-2}$$

unde p_{at} este presiunea atmosferică la suprafața liberă a apei ($p_{at} = 0$, în scară relativă, iar $p_{at} = 10^5\ \text{N/m}^2 = 1\ \text{bar}$, în scară absolută), ρ este densitatea apei ($\rho \approx 1000\ \text{kg/m}^3$ pentru apă dulce şi $\rho = 1018\ \text{kg/m}^3$ pentru apă de mare), g este accelerația gravitațională ($g = 9{,}81\ \text{m/s}^2 \approx 10\ \text{m/s}^2$ g = 9,81 m/s² ≈ 10 m/s²), iar h este adîncimea, în metri, la care presiunea apei este p. Astfel, la o adâncime h = 20 m, în apă dulce, presiunea va fi:

$$p = 1000 \cdot 10 \cdot 20 = 2 \cdot 10^5\ \text{N/m}^2 = 2\ \text{bar (sc. man.)},$$

în scară relativă, sau:

$$g = 10^5 + 1000 \cdot 10 \cdot 20 = 3 \cdot 10^5\ \text{N/m}^2 = 3\,\text{bar}\,\text{(sc. abs.)},$$

în scară absolută.

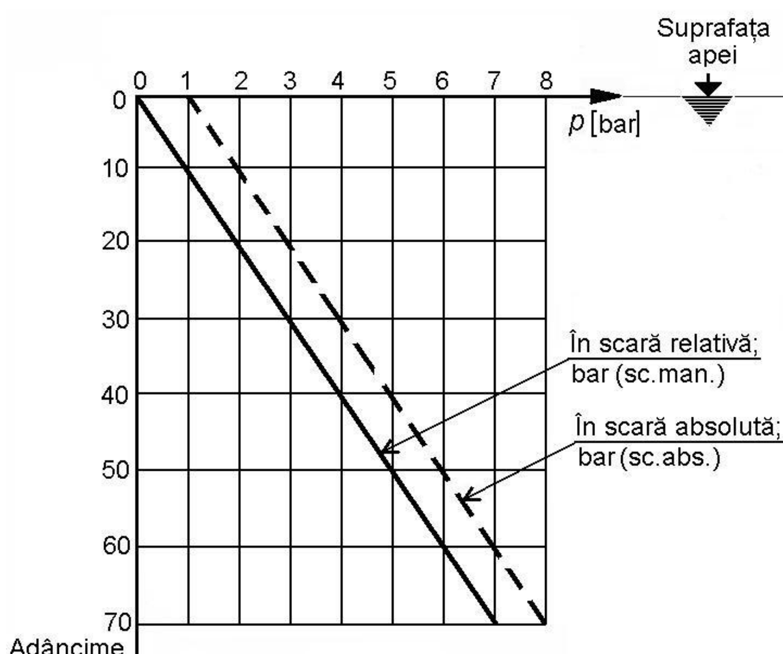


Fig. 1.2. Creşterea presiunii cu adâncimea.

Ținând cont de legea generală a hidrostaticii şi de relația între scările de exprimare a presiunii, în tabelul 1.1 se prezintă modul în care variază presiunea cu adâncimea în scară relativă şi absolută.

În tabelul de mai jos, presiunile apei la diferite adâncimi au fost calculate pentru o densitate a apei $\rho = 1000$ kg/m³, valabilă pentru apă dulce. Apa de mare are densitatea $\rho = 1012...1018$ kg/m³, dar pentru adâncimi de până la 70 m se poate considera aproximativ egală cu 1000 kg/m³ fără a face o eroare semnificativă, deoarece această eroare este inferioară erorii de precizie a unui aparat ca profundimetrul.

Tabelul 1.1

Creşterea presiunii cu adâncimea, în scară relativă şi absolută

Adâncimea h [m]	Presiunea în scară relativă $(p)_{rel}$ [bar (sc. man.)]	+	Presiunea atmosferică $(p_{at})_{abs}$ [bar (sc. abs.)]	=	Presiunea în scară absolută $(p)_{abs}$ [bar (sc. abs.)]
Suprafaţă 0	0	+	1	=	1
10	1	+	1	=	2
20	2	+	1	=	3
30	3	+	1	=	4
40	4	+	1	=	5
50	5	+	1	=	6
60	6	+	1	=	7

La gaze, unde densitatea este mult mai redusă ca la lichide (ex.: $\rho_{aer} = 1,21$ kg/m^3, iar $\rho_{apă} = 1000$ kg/m^3), se poate neglija termenul $\rho g h$ care reprezintă variaţia presiunii cu adâncimea. Astfel, se poate considera $p \sim$ constant în tot domeniul ocupat de gaz. Din acest motiv, presiunea aerului sau amestecului respirator dintr-o butelie de stocare, dintr-o barocameră, sau dintr-o turelă presurizată, poate fi considerată ca având aceeaşi valoare în orice punct din interiorul acestora.

1.1.5. COMPRESIBILITATEA GAZELOR

Compresibilitatea este proprietatea corpurilor fluide (lichide şi gaze) de a-şi modifica volumul la modificarea presiunii. Atunci când presiunea creşte, volumul corpului fluid scade şi invers.

Gazele, printre care şi aerul şi amestecurile gazoase binare sau ternare utilizate în scufundare, sunt mult mai compresibile decât lichidele. De aceea, în aplicaţiile practice specifice scufundării, lichidele se vor considera practic incompresibile, iar gazele ca fiind fluide compresibile.

Pentru a deduce relaţiile de stare care guvernează modificările de volum ale unui gaz la modificarea presiunii, se prezintă în continuare următoarea observaţie experimentală. Fie un clopot de scufundare nealimentat cu aer (fig. 1.3).

Acest clopot, situat iniţial la suprafaţa apei unde presiunea este presiunea atmosferică, adică 1 bar (sc. abs.), are un volum de aer V (ex. V = 2000 litri). Coborând clopotul progresiv în apă, menţinându-l vertical pentru a nu pierde aerul din interior şi considerând că temperatura aerului rămâne constantă, se constată că volumul de aer va scădea invers proporţional cu presiunea (tab. 1.2).

Experienţa de mai sus pune în evidenţă tocmai legea *Boyle-Mariotte* valabilă pentru o transformare izotermă (la temperatură constantă):

$$pV = \text{constant}, \tag{1-3}$$

unde p este presiunea în scară absolută, iar V este volumul masei de gaz.

Atunci când variază temperatura gazului o dată cu modificarea presiunii, legea capătă o formă mai generală, numită *relația lui Clapeyron*:

$$pV = MRT, \tag{1–4}$$

unde p este presiunea în scară absolută (N/m²), M este masa gazului considerat (kg), T este temperatura absolută a acestuia (K), iar R reprezintă constanta gazului respectiv (J/kg K). Relația de mai sus, prin împărțirea cu masa M, se mai poate scrie sub forma:

$$p/\rho = RT \text{ sau } pv = RT, \tag{1–5}$$

unde ρ şi v sunt densitatea (kg/m³) respectiv volumul specific (m³/kg) ale gazului considerat $(v = 1/\rho)$.

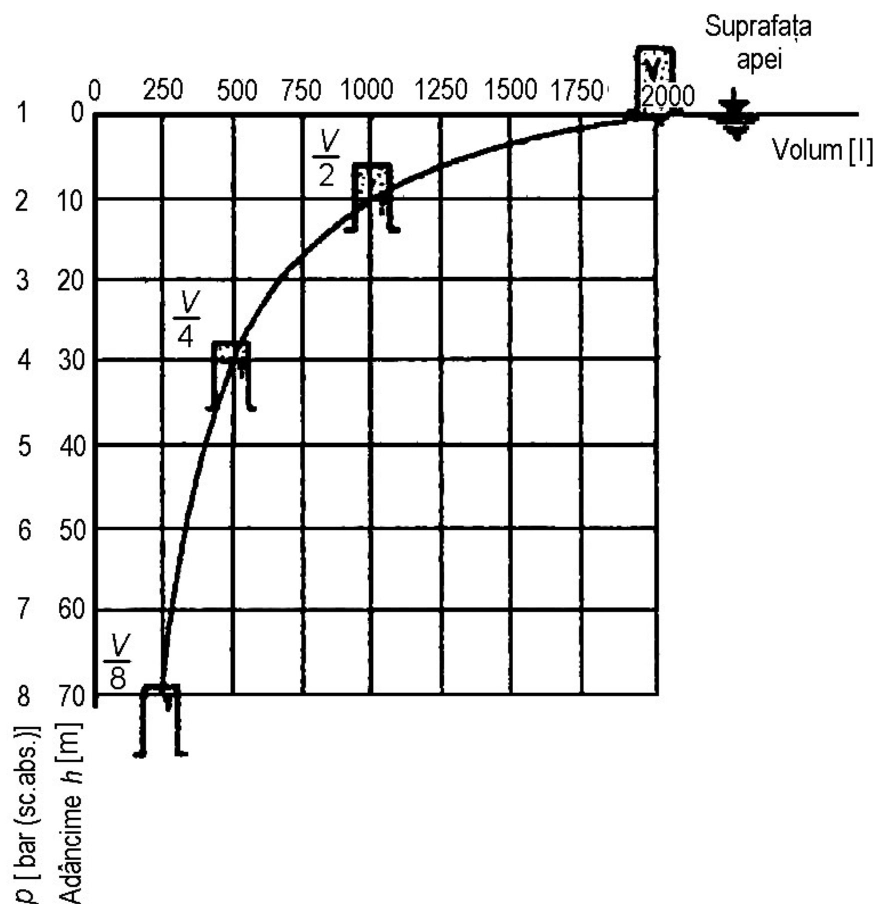


Fig. 1.3. Modificarea volumului unui gaz cu adâncimea (presiunea).

Tabelul 1.2

Modificarea volumului unui gaz funcție de presiune

Adâncimea h [m]	Presiunea în scară absolută p [bar (sc. abs.)]	Volumul gazului de sub clopot *Vol* [ℓ]
Suprafață 0	1 bar	V = 2000
10	2 bar	V/2 = 1000
30	4 bar	V/4 = 500
70	8 bar	V/8 = 250

Pentru T = constant (transformare izotermă) rezultă:

$$p/\rho = \text{constant} \quad \text{sau} \quad pv = \text{constant}, \qquad (1\text{-}6)$$

relații echivalente cu relația Boyle-Mariotte $pV = \text{constant}$.

Aceste ultime relații arată creşterea densității gazului la creşterea presiunii. Astfel, la o scufundare cu aer, dacă densitatea gazului respirat este de $\rho_{at} = 1{,}2$ kg/m³ la suprafața apei [la presiunea atmosferică: $p_{at} = 1$ bar (sc. abs.) $=1\cdot10^5$ N/m² (sc. abs.)], ținând cont că, datorită concepției aparatului de respirat sub apă, scafandrul respiră aer la o presiune egală cu presiunea corespunzătoare adâncimii de imersie, densitatea aerului respirat va fi de $\rho_{40} = 6$ kg/m³ la 40 m adâncime, acolo unde presiunea este $p_{40} = 5$ bar (sc. abs.) = $5\cdot10^5$N/m² (sc. abs.), conform relațiilor de calcul:

$$\frac{p_{at}}{\rho_{at}} = \frac{p_{40}}{\rho_{40}},$$

de unde

$$\rho_{40} = p_{40}\frac{\rho_{at}}{p_{at}} = 5\cdot10^5 \cdot \frac{1{,}2}{1\cdot10^5} = 6 \text{ kg/m}^3.$$

1.2. AERUL CA AMESTEC DE GAZE

În cazul scufundării cu aer, scafandrul utilizează pentru respirația sub apă, aer livrat de aparatul de respirat sub apă cu circuit deschis. Aerul utilizat în scufundare este chiar aerul atmosferic comprimat în buteliile de stocaj, cu ajutorul compresorului. Aerul atmosferic este un amestec natural de gaze. În tabelul 1.3 este prezentată compoziția aerului exprimată atât prin concentrațiile C (%), cât şi prin participațiile volumice r ale gazelor pure ce-l compun.

Tabelul 1.3

Compoziția aerului atmosferic exprimată în concentrații şi participații volumice

Gazele care compun aerul	Concentrațiile componentelor gazoase C [%]	Participațiile volumice ale componentelor gazoase r [-]
Oxigen (O_2)	20,93	0,2093
Azot (N_2)	78,10	0,7810
Argon (Ar)	0,9325	0,009325
Bioxid de carbon (CO_2)	0,01	0,000100
Hidrogen (H_2)	0,0018	0,000018
Neon (Ne)	0,0005	0,000005
Kripton (Kr)	0,0001	0,000001
Xenon (Xe)	0,000009	0,00000009

Suma concentrațiilor gazelor pure ce compun aerul este egală cu 100%, iar suma participațiilor volumice, r , ale aceloraşi componente este egală cu 1.

Este evident faptul că, exceptând oxigenul şi azotul, suma concentrațiilor celorlalte gaze ce compun aerul este mai mică de 1%. Din acest motiv, în cadrul problemelor legate de scufundarea cu aer, se poate considera că aerul este practic un amestec oxigen-azot (O_2, N_2), compus din 21% oxigen ($r_{O_2} = 0,21$) şi 79% azot ($r_{N_2} = 0,79$). Deci, se poate scrie că:

$$r_{O_2} + r_{N_2} = 0,21 + 0,79 = 1 . \qquad (1–7)$$

La temperatură constantă, presiunea unui amestec de gaze este egală cu suma presiunilor pe care le-ar avea fiecare din gazele componente dacă ar ocupa singur volumul total, sau altfel spus, presiunea amestecului de gaze este egală cu suma presiunilor parțiale ale gazelor pure care îl compun. Aceasta este *legea lui Dalton*. Astfel, pentru aer se poate scrie:

$$p_{aer} = p_{O_2} + p_{N_2} . \qquad (1–8)$$

Presiunile parțiale ale fiecărui gaz component al aerului se calculează cu relațiile:

$$p_{O_2} = r_{O_2} \cdot p_{aer} , \qquad (1–9)$$

$$p_{N_2} = r_{N_2} \cdot p_{aer} . \qquad (1–10)$$

Pentru aer la presiunea atmosferică [p_{aer} = 1 bar (sc. abs.)], presiunile parțiale ale celor două componente gazoase sunt:

$$p_{O_2} = 0,21 \cdot 1 = 0,21 \text{ bar (sc. abs.)} ,$$

$$p_{N_2} = 0,79 \cdot 1 = 0,79 \text{ bar (sc. abs.)} .$$

Suma presiunilor parțiale ale gazelor componente este evident egală cu presiunea amestecului gazos (aerului), deci, în acest caz, tocmai presiunea atmosferică:

$$p_{aer} = p_{O_2} + p_{N_2} = 0,21 + 0,79 = 1 \text{ bar (sc. abs.)} .$$

Pentru aer la presiunea $p_{aer} = 5$ bar (sc. abs.), presiunile parțiale ale oxigenului şi azotului vor fi:

$$p_{O_2} = 0,21 \cdot 5 = 1,05 \text{ bar (sc. abs.)},$$

$$p_{N_2} = 0,79 \cdot 5 = 3,95 \text{ bar (sc. abs.)}.$$

Şi în acest caz, suma presiunilor parțiale ale componentelor este egală cu presiunea aerului:

$$p_{aer} = p_{O_2} + p_{N_2} = 1,05 + 3,95 = 5 \text{ bar (sc. abs.)}.$$

În timpul scufundării cu aer, scafandrul respiră aer compus din 21% oxigen şi 79% azot, participațiile volumice ale componentelor gazoase rămânând constante ($r_{O_2} = 0,21$, $r_{N_2} = 0,79$), indiferent de adâncime. Ținând cont că aparatul de respirat sub apă cu aer este astfel conceput încât să permiă scafandrului să respire aer la presiune egală cu presiunea corespunzătoare adâncimii de imersie, rezultă că, în timpul coborârii, presiunea aerului respirat de scafandru creşte o dată cu creşterea adâncimii h conform legii generale a hidrostaticii $p = p_{at} + \rho g h$. Deoarece în timpul coborârii presiunea gazului respirat de scafandru din aparat creşte, vor creşte şi presiunile parțiale ale oxigenului şi azotului care îl compun (tab. 1.4).

Tabelul 1.4

Creşterea presiunilor parțiale ale componentelor aerului respirat cu creşterea adâncimii de scufundare

Adâncimea de scufundare h [m]		Presiunea aerului respirat p_{aer} [bar (sc. abs.)]	Presiunile parțiale ale componentelor gazoase ale aerului respirat	
			p_{O_2} [bar (sc. abs.)]	p_{N_2} [bar (sc. abs.)]
Suprafață	0	1	0,21	0,79
	10	2	0,42	1,58
	20	3	0,63	2,37
	30	4	0,84	3,16
	40	5	1,05	3,95
	50	6	1,26	4,74
	60	7	1,47	5,53
	70	8	1,68	6,32

Cercetările de medicina scufundării limitează superior presiunea parțială a azotului din amestecul de gaze respirat la $p_{N2} = 5,3$ bar (sc. abs.) pentru evitarea apariției fenomenului de "narcoză a azotului" ("beția adâncurilor") şi presiunea parțială a oxigenului la $p_{O2} = 1,7$ bar (sc. abs.) pentru preîntâmpinarea apariției crizei de hiperoxie datorată creşterii, peste limita critică, a nivelului de oxigen din amestecul respirator.

Din tabelul 1.4 rezultă că, la scufundările cu aer, "narcoza azotului" limitează scufundarea la 58 m, iar criza hiperoxică limitează scufundarea la 70 m. Ținând cont

de cele de mai sus, s-a considerat că limita maximă de scufundare cu aer nu trebuie să depăşească adâncimea de 60 m, în acest fel, evitându-se apariţia celor două fenomene.

Pentru scafandri începători, care nu-şi cunosc comportamentul la "narcoza azotului", fenomen care îşi poate face apariţia la adâncimi cuprinse între 40 m şi 60 m, se recomandă ca aceştia să nu depăşească, în scufundarea cu aer, adâncimea de 40 m.

1.3. DIZOLVAREA ŞI DEGAJAREA GAZELOR

Gazele se dizolvă în lichidele cu care vin în contact. În condiţii obişnuite, fenomenul urmează *legea lui Henry*: la temperatură constană, masa de gaz dizolvată într-un lichid, la saturaţie, variază direct proporţional cu presiunea parţială a gazului aflat în contact cu lichidul. Dacă temperatura creşte, cantitatea de gaz dizolvată, la saturaţie, scade şi invers.

Cantitatea de gaze, dizolvată în lichid, la saturaţie, este funcţie atât de tipul lichidului cât şi de tipul gazului.

La un amestec de gaze aşa cum este aerul respirat de scafandri, cantitatea de gaz dizolvată va fi proporţională cu presiunea parţială a fiecărui gaz component al amestecului. Spre exemplu, dacă aerul are o presiune de 4 bar (sc. abs.), cantitatea de oxigen dizolvată în lichid va fi proporţională cu $p_{O_2} = 0{,}21 \cdot 4 = 0{,}84$ bar (sc. abs.), iar cantitatea de azot dizolvată în acelaşi lichid va fi proporţională cu $p_{N_2} = 0{,}79 \cdot 4 = 3{,}16$ bar (sc. abs.).

Procesul invers dizolvării este degajarea gazului din lichid, care se produce la scăderea presiunii.

1.3.1. SATURAŢIA

Pentru o mai bună înţelegere a fenomenelor de dizolvare şi degajare, se propune următorul experiment (fig. 1.4). Se consideră un recipient ce conţine un lichid, iniţial degazat, deasupra căruia se constituie o pernă de gaz pur cu presiunea P . Gazul se va dizolva în lichid (se va produce absorbţia gazului în lichid) până când lichidul se va satura cu gaz dizolvat. *Saturaţia* unui lichid cu un gaz dizolvat corespunde cantităţii maxime de gaz pe care lichidul îl poate absorbi la temperatură şi presiune constantă. Saturaţia este atinsă într-un anumit timp, curba reprezentând saturarea lichidului cu gaz având forma unei exponenţiale (fig. 1.4)

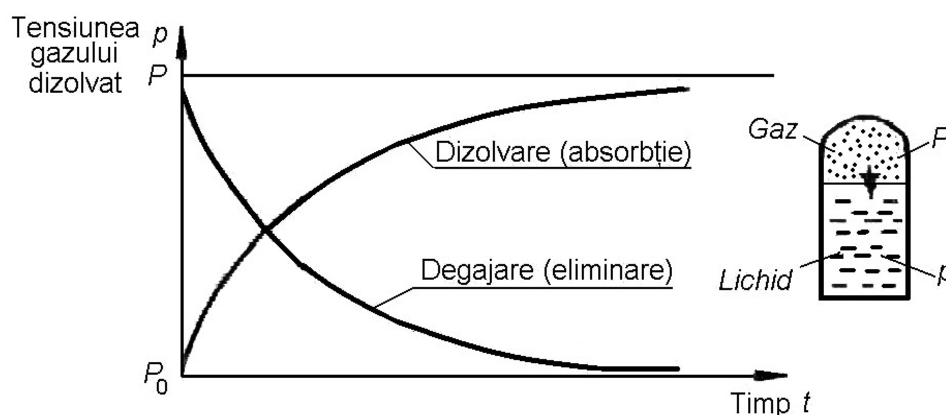


Fig. 1.4. Dizolvarea gazelor în lichide şi eliminarea gazelor din lichide.

Definind tensiunea gazului dizolvat, *p*, aceasta creşte pe măsura trecerii timpului datorită creşterii cantităţii de gaz dizolvat în lichid. La saturaţie, tensiunea gazului dizolvat, *p*, atinge practic valoarea presiunii *P* a gazului de deasupra lichidului.

Atunci când gazul de deasupra lichidului nu este pur ci este un amestec de gaze, fiecare gaz component se va dizolva şi curbele de creştere a tensiunilor vor fi funcţie de presiunile parţiale ale gazelor ce compun amestecul.

1.3.2. DESATURAREA

Invers, dacă un lichid saturat cu gaz la presiunea *P* este adus la presiunea P_0, mai mică decât *P*, saturaţia lichidului va trece de la valoarea *p* = *P* la valoarea $p = P_0$. Curba de *desaturare* (de degajare sau de eliminare a gazului dizolvat) va fi o curbă exponenţială inversă şi simetrică cu precedenta (fig. 1.4).

1.3.3. SUPRASATURAŢIA

Atunci când scade presiunea exterioară, tensiunea gazului dizolvat devine superioară presiunii gazului aflat în contact cu lichidul. În acest caz, se spune că lichidul este în stare de *suprasaturaţie* . Suprasaturaţia este o stare instabilă şi există o valoare limită a raportului dintre presiunea gazului dizolvat şi presiunea ambiantă, de la care echilibrul instabil este rupt, apărând fenomenul de degajare cu apariţia de bule. Această limită poartă numele de *raport critic de suprasaturaţie*.

Fenomenele de dizolvare (absorbţie) şi degajare (eliminare) a gazelor în şi respectiv din lichide stau la baza explicării fenomenelor de saturare, desaturare şi suprasaturare a ţesuturilor organismului scafandrului cu gazul inert (azotul, heliul, neonul etc.) conţinut în aerul respirator, în timpul coborârii sub apă (creşterii presiunii) şi respectiv în timpul urcării către suprafaţa apei (scăderii presiunii). În figura 1.5 se prezintă curbele de absorbţie şi eliminare a azotului de către un ţesut al organismului uman.

Spre exemplu, azotul este caracterizat printr-o solubilitate în apă de 14,5 mℓ/ℓ şi printr-o solubilitate în grăsimi de 76 mℓ/ℓ, iar heliul printr-o solubilitate în apă de 9,2 mℓ/ℓ şi printr-o solubilitate în grăsimi de 17 mℓ/ℓ.

În ceea ce priveşte fenomenul de suprasaturaţie, în cazul organismului uman, raportul critic de suprasaturţie al diferitelor ţesuturi este de ordinul de mărime 2. Respectarea acestei limite de suprasaturaţie este foarte importantă în evitarea, pe timpul urcării scafandrului către suprafaţa apei, a degajării gazului inert din ţesuturi cu apariţia de bule care pot conduce la declanşarea accidentelor de decompresie.

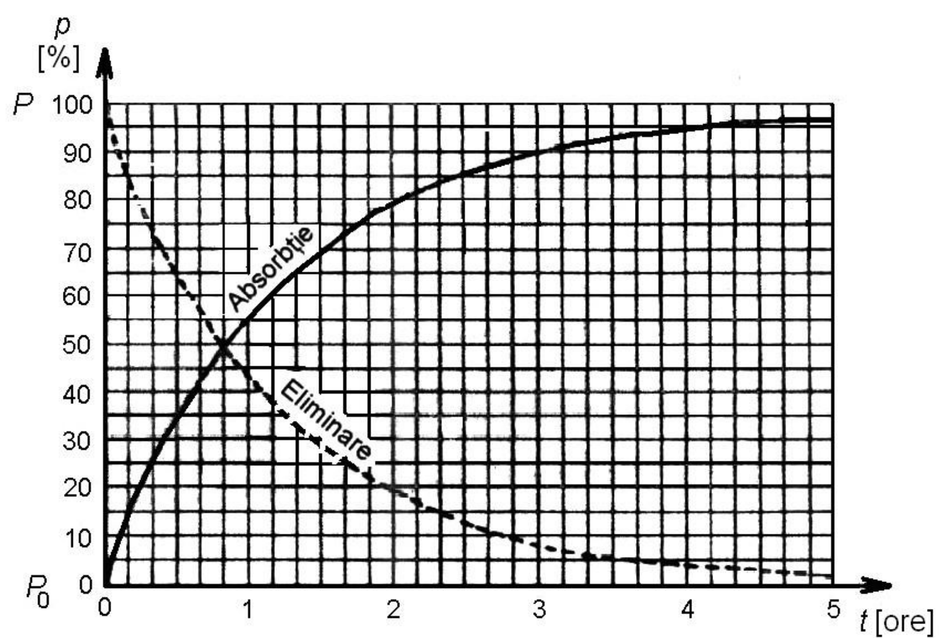


Fig. 1.5. Curbele teoretice de absorbție şi eliminare a azotului de către un țesut al organismului uman.

2.

ELEMENTE DE FIZIOLOGIA SCUFUNDĂRII

Elementele de fizica scufundării prezentate în capitolul 1 se referă la fenomene fizice care se manifestă în timpul scufundării, având repercursiuni asupra organismului uman.

În acest capitol sunt prezentate aspectele cele mai importante legate de fiziologia scufundării, aspecte care trebuie bine cunoscute atât de scafandru, cât şi de membrii echipaei de suprafaţă pentru înţelegerea corespunzătoare a regulilor foarte stricte ce trebuie respectate în vederea preîntâmpinării diferitelor accidente care pot apărea în timpul scufundării.

De asemenea, buna cunoaştere a principalelor aspecte ale fiziologiei scufundării permite scafandrilor şi membrilor echipei de suprafaţă o mai bună înţelegere a rolului pe care îl au diferitele piese de echipament şi a cerinţelor pe care trebuie să le îndeplinească acestea, diferitele elemente ale instalaţiilor hiperbare, precum şi tehnologiile hiperbare utilizate, în vederea asigurării funcţionării corespunzătoare a organismului uman în condiţiile impuse de mediul acvatic în care scafandrul trebuie să evolueze.

2.1. EFECTELE PRESIUNII

Corpul omenesc nu este un mediu omogen, ci un mediu semiporos. Organismul uman este format din solide (oase, cartilagii), lichide (celule, sânge, lichide interstiţiale) şi gaze conţinute în cavităţi (plămâni, căi aeriene, ureche medie, sinusuri, intestine, stomac).

Solidele şi lichidele sunt practic incompresibile şi deci variaţiile de presiune la care este supus scafandrul în timpul scufundării reale sau simulate, nu le afectează. În schimb, gazele din corpul omenesc, comportându-se ca fluide compresibile, suferă modificări importante sub acţiunea presiunii mediului ambiant, iar efectele presiunii asupra acestor gaze sunt determinante în apariţia diferitelor fenomene specifice fiziologiei scufundării.

Pentru o mai bună înţelegere a efectelor presiunii asupra organismului scafandrului, trebuie reamintit faptul că scafandrul echipat cu aparatul de respirat sub apă, respiră aer sau alt amestec respirator la o presiune egală cu presiunea ambiantă, corespunzătoare adâncimii de imersie.

Efectele presiunii asupra corpului omenesc pot fi împărţite în trei categorii şi anume: *efecte mecanice, efecte biofizice* şi *efecte biochimice.*

2.1.1. EFECTELE MECANICE ALE PRESIUNII

Efectele mecanice ale presiunii au la bază faptul că gazele aflate în cavităţile

organismului uman se supun legii Boyle-Mariotte şi se referă la acţiunea presiunii asupra gazelor din aparatul respirator pulmonar, precum şi asupra volumelor gazoase abdominale.

2.1.1.1. Acțiunea presiunii asupra aparatului respirator pulmonar

În cele ce urmează, se vor prezenta elemente generale privind structura aparatului pulmonar, fiziologia aparatului respirator şi efectele presiunii asupra aparatului respirator şi a anexelor sale.

a) Structura aparatului respirator pulmonar

În continuare, sunt prezentate componentele principale ale aparatului respirator pulmonar, încercând o selecţie care să permită, ca din complicatul eşafodaj, să fie puse în evidență acele elemente de interes general care să conducă la o bună înțelegere anatomo-morfologică.

Aparatul respirator pulmonar poate fi considerat ca fiind alcătuit din următoarele componente: căile respiratorii, plămânii şi cavitățile pneumatice (fig. 2.1).

Căile respiratorii cuprind nasul, faringele, laringele, traheea, bronhiile şi bronhiolele.

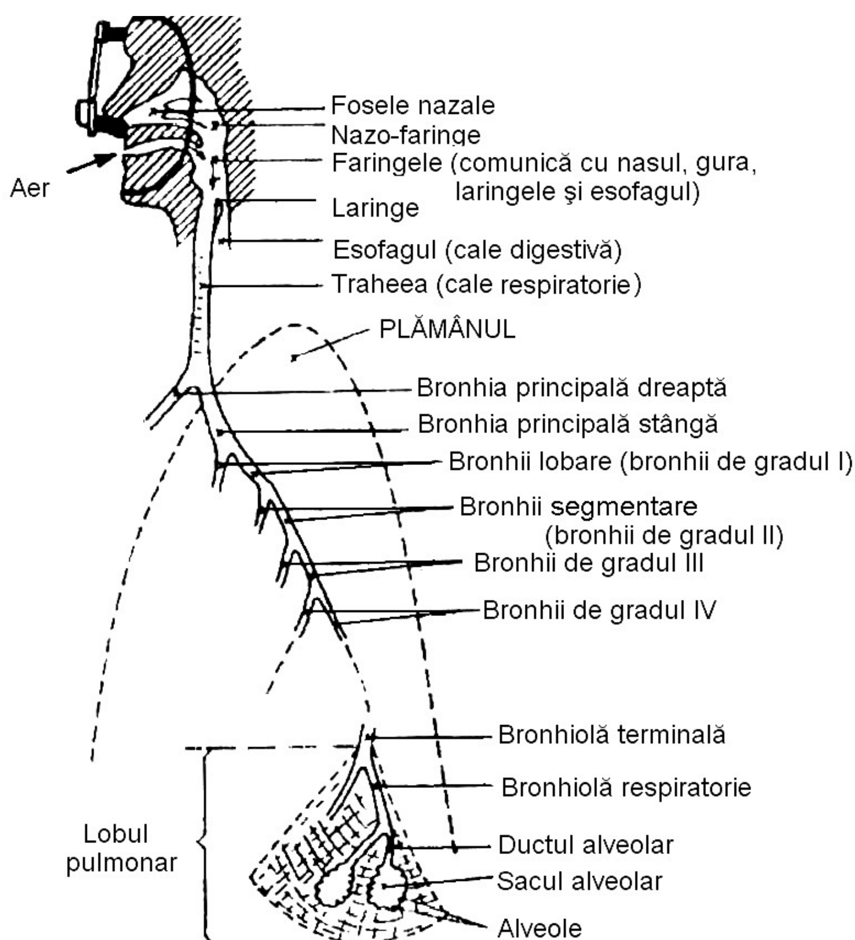


Fig. 2.1. Aparatul respirator pulmonar. Căile respiratorii.

Plămânii sunt organe spongioase şi elastice situate în cavitatea toracică. Cele două bronhii principale ce ramifică traheea, pătrund în cei doi plămâni la nivelul unei

zone numită hil pulmonar. Din volumul total al corpului omenesc, volumul plămânilor ocupă 35...40%. Dimensiunile plămânilor variază cu sexul, vârsta şi momentul funcţional.

Plămânii pot fi consideraţi ca un ansamblu de lobuli pulmonari (fig. 2.2). Lobulul pulmonar este o mică masă în formă de piramidă cu volumul de circa 1 cm^3, constituită din ramificaţiile bronhiilor secundare şi din vase sanguine. În interiorul lobulului, bronhia îşi pierde structura ei cartilaginoasă devenind bronhiolă intralobulară. Aceasta, la rândul ei, se ramifică în bronhiole respiratorii care şi ele se ramifică în canale alveolare. Canalele alveolare se termină în sacii alveolari. Atât canalele alveolare cât şi sacii alveolari sunt cudaţi, având forma unor nişe semisferice, numite alveole pulmonare. Alveolele pulmonare reprezintă elementele funcţionale ale plămânului, ele constituind compartimentele în care se efectuează schimbul de gaze dintre aerul sau amestecul gazos respirat şi sânge.

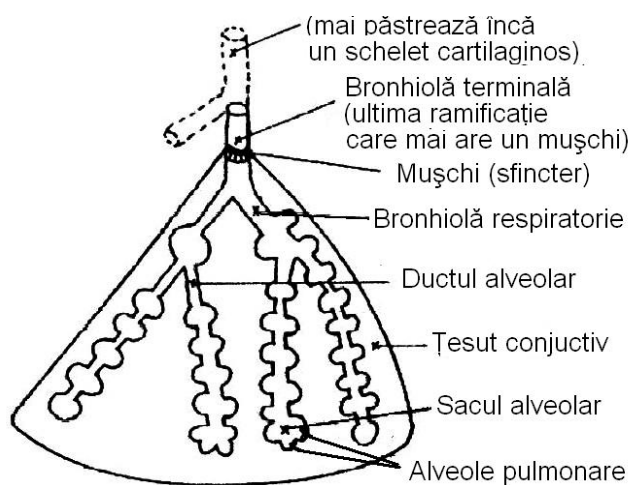


Fig. 2.2. Lobul pulmonar (schemă).

Cavităţile pneumatice nu au nici un rol respirator direct, ele comunicând cu căile aeriene propriu-zise. Cavităţile pneumatice sunt sinusurile (frontale, maxilare, etmoidale şi sfenoidale) (fig. 2.3) şi urechea medie (fig. 2.4) ce se deschide în faringele nazal care face trecerea dinspre fosele nazale spre cavitatea bucală.

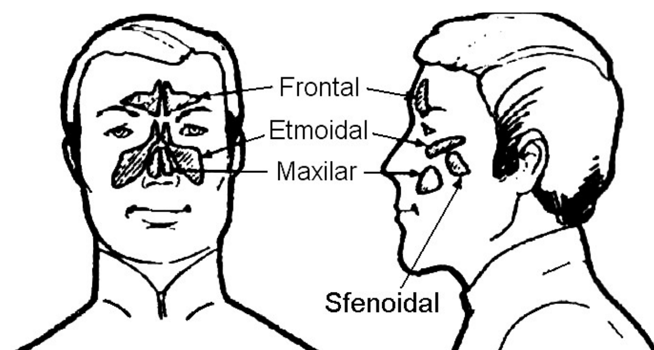


Fig. 2.3. Sinusurile.

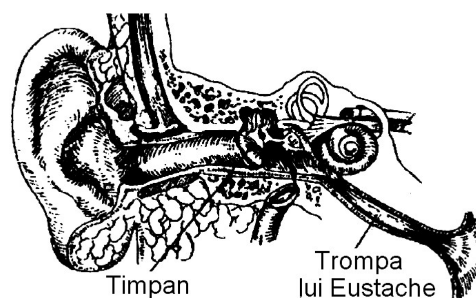


Fig. 2.4. Schema de ansamblu a urechii.

b) Fiziologia aparatului respirator pulmonar

Respiraţia este definită ca succesiunea regulată a mişcărilor de inspiraţie şi

expirație care conduce la reînnoirea constantă a aerului sau a altui amestec respirator gazos, la nivelul alveolelor pulmonare. Prin urmare, respirația comportă două faze: inspirația şi expirația.

Inspirația este un proces activ. Muşchii inspiratori se contractă mărind dimensiunile cutiei toracice, în special partea inferioară a acesteia, prin coborârea muşchiului diafragm. Plămânii, fiind solidari cu cutia toracică, vor suferi şi ei o dilatare, ceea ce conduce la apariția unei scăderi a presiunii la nivel alveolar sub valoarea presiunii mediului înconjurător (la un scafandru aflat în imersie şi respirând aer la presiune egală cu presiunea exterioară, la inspirație, presiunea aerului din plămâni scade sub valoarea presiunii corespunzătoare adâncimii de imersie). Această scădere a presiunii din plămâni conduce la antrenarea de aer din aparatul de respirat sub apă.

Expirația este o mişcare pasivă. Când încetează acțiunea muşchilor inspiratori, cutia toracică tinde să revină la forma şi dimensiunile inițiale. Plămânii fiind elastici se retractă şi ei, iar muşchiul diafragm este atras în sus. Astfel, amestecul gazos sărăcit în oxigen din plămâni este expulzat către exterior. La scafandrul respirând cu aparat de respirat sub apă cu circuit deschis, amestecul gazos sărăcit în oxigen expirat este evacuat prin supapa de expirație şi deflectorul de bule, în mediul acvatic exterior. În mod excepțional, muşchii expiratori ajută la expirație, aceasta devenind activă.

Fazele de inspirație şi expirație se succed ritmic, constituind un ciclu respirator. Frecvența respiratorie este de circa 16 cicli pe minut la bărbat şi de circa 18 cicli pe minut la femeie. La scafandri, utilizând un aparat de respirat sub apă, frecvența respiratorie este ceva mai scăzută dar, în schimb, respirația este mai amplă.

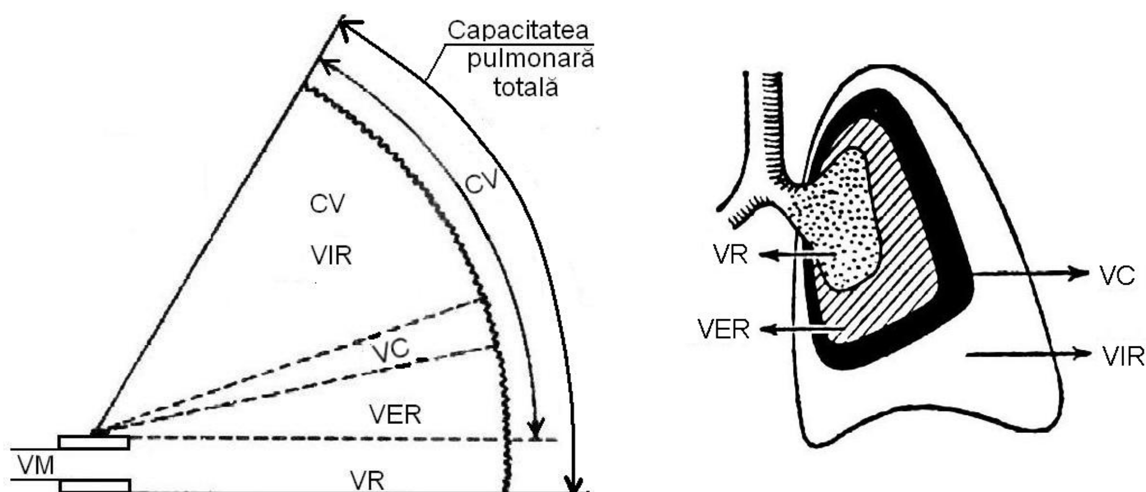


Fig. 2.5. Prezentarea schematică a volumelor pulmonare.

Este cunoscut faptul că există posibilitatea de a varia în mod voluntar volumele de aer şi de amestecuri gazoase inspirate şi expirate. Astfel, defalcate pe anumite momente ale ciclului respirator, se disting următoarele volume pulmonare (fig. 2.5):

– *volumul curent* (*VC*), care este volumul inspirat şi expirat în timpul unui ciclu respirator normal (în mod obişnuit *VC* = 500 ml);

– *volumul inspirator de rezervă* (*VIR*), care este volumul suplimentar inspirat după efectuarea unei inspirații normale prin prelungirea inspirației normale cu o inspirație forțată (*VIR* ≈ 3000 ml);

– *volumul expirator de rezervă* (*VER*), care este volumul suplimentar evacuat printr-o expirație forțată efectuată la sfârşitul expirației normale (*VER* ≈ 1100 ml);

– *capacitatea vitală* (*CV*), care se calculează însumând volumul curent (*VC*), volumul inspirator de rezervă (*VIR*) şi volumul expirator de rezervă (*VER*); capacitatea vitală este deci, volumul expirat printr-o expirație forțată după o inspirație forțată (*CV* ≈ 4600 ml);

– *volumul rezidual* (*VR*), care este volumul de gaze ce continuă să rămână în plămâni, chiar după o expirație forțată (*VR* ≈ 1200 ml);

– *volumul spațiului mort* (*VM*), care cuprinde gazele conținute în bronhii, în căile aeriene superioare, în gură, în fosele nazale, precum şi în sinusuri şi în urechea medie; în aceste spații nu se produce nici un schimb de gaze cu toate că în interiorul lor se află un amestec gazos.

Totalitatea proceselor mecanice (externe) şi chimice (interne) care asigură schimbul de gaze la nivelul plămânilor poartă numele de *ventilație pulmonară.*

Ventilația pulmonară permite aprovizionarea alveolelor cu oxigen, care va trece în sânge şi evacuarea în exterior a dioxidului de carbon pe care sângele îl deversează în alveole (fig. 2.6).

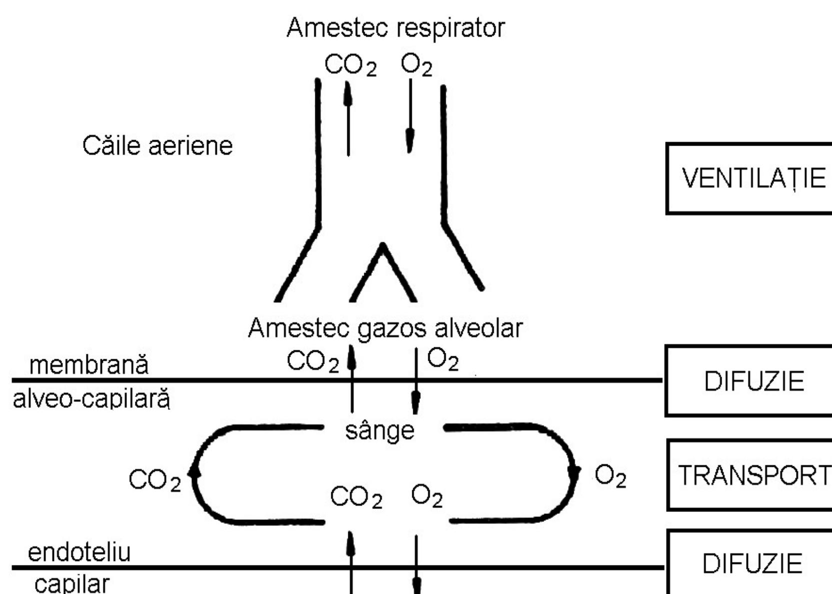


Fig. 2.6. Schema schimbului de gaze:
amestec respirator – amestec gazos alveolar – sânge – țesuturi (*Bell*, 1965).

Curățirea sângelui de dioxidul de carbon şi reaprovizionarea lui cu oxigenul necesar metabolismului, reprezintă hematoza, care este o funcție a plămânilor diferită de ventilația pulmonară.

c) Efectele presiunii asupra aparatului respirator pulmonar şi a anexelor acestuia

Efectele presiunii asupra aparatului respirator pulmonar, se referă la modificările de volume pulmonare şi la modificările de lucru mecanic pentru respirație.

• Modificări de volume pulmonare

Aparatul pulmonar cuprinde o parte deformabilă (alveolele şi bronhiolele) şi o parte nedeformabilă (căile aeriene şi cavitățile anexe).

Atunci când un scufundător pătrunde în apă reținându-şi respirația (în apnee), pe măsura coborârii, creşterea presiunii ambiante conduce la o diminuare a volumului gazos conținut în aparatul pulmonar, prin deformarea toracelui şi a plămânilor. În cazul scafandrului echipat cu aparat de respirat sub apă, acesta respiră, pe întreaga perioadă a scufundării, aer sau amestec respirator pe care aparatul de respirat sub apă îl livrează la o presiune egală cu presiunea corespunzătoare adâncimii de imersie. În acest caz, volumul pulmonar nu variază decât foarte puțin, dar masa de amestec de gaze din interiorul plămânilor creşte fiind vorba de aer sau amestec de gaze la presiune egală cu presiunea ambiantă.

Cercetările efectuate în barocamere au pus în evidență următoarele modificări de volume pulmonare sub acțiunea presiunii: creşterea volumului curent (*VC*), creşterea uşoară a volumului expirator de rezervă (*VER*), diminuarea volumului inspirator de rezervă (*VIR*) şi creşterea uşoară a capacității vitale (*CV*).

Modificarea volumelor respiratorii este datorată creşterii densității aerului sau amestecului respirator respirat, o dată cu creşterea presiunii.

În cazul urcării de urgență a scafandrului către suprafața apei, dacă urcarea este rapidă şi dacă apare tendința scafandrului de a rămâne cu respirația blocată, se va produce o creştere importantă a volumului de aer sau de amestec de gaze din plămâni datorită scăderii presiunii ambiante, conform legii Boyle-Mariotte. Această umflare a plămânilor, care poate avea consecințe grave, poate fi evitată dacă scafandrul va avea grijă să expire permanent surplusul de amestec de gaze ce apare în plămâni în timpul ridicării către suprafață.

• Echilibrarea presiunii în sinusuri şi în urechi

Aerul sau amestecul respirator, pe care scafandrul, echipat cu aparat de respirat sub apă, îl respiră la presiune egală cu presiunea corespunzătoare adâncimii de imersie, trebuie să pătrundă şi în cavitățile anexe (sinusuri şi ureche medie), astfel încât presiunea din interiorul acestor cavități să fie în echilibru cu presiunea ambiantă. Pentru sinusurile frontale şi maxilare, echilibrarea presiunii se face, de obicei, automat fără ca scafandrul să facă vreo manevră de echilibrare. Pentru urechea medie, situată între timpan şi trompa lui Eustache, trecerea amestecului de gaze pentru compensarea presiunii se face prin trompa lui Eustache. Acest conduct este construit ca o supapă (fig. 2.7) care, de obicei, permite trecerea gazelor dinspre urechea medie către faringe fără ca scafandrul să facă vreo manevră, dar nu permite trecerea gazelor dinspre faringe către urechea medie decât dacă scafandrul face o manevră de echilibrare a urechii. De aceea, în timpul coborârii, scafandrul trebuie să efectueze o manevră care să permită deschiderea trompei lui Eustache (fig. 2.8) în vederea egalizării presiunii din urechea medie cu presiunea din faringe care, la rândul ei, este egală cu presiunea mediului ambiant datorită faptului că scafandrul respiră aer sau amestec de gaze la presiune egală cu presiunea ambiantă.

Cele mai cunoscute metode de echilibrare a urechilor sunt *metoda deglutiției* (înghițire sau simulare de înghițire) şi *metoda Valsalva* (fig. 2.9) (se strânge nasul cu degetele şi se suflă suficient de puternic). Prin aceste metode se deschide trompa lui Eustache, iar amestecul de gaze pătrunde în urechea medie realizându-se echilibrarea presiunii din cavitatea urechii medii cu presiunea exterioară, timpanul rămânând astfel nedeformat. În afară de aceste două metode de echilibrare, mai există şi alte metode

cum ar fi: *metoda Frenzel, deschiderea tubară voluntară* (DTV) şi *metoda Toynbee*.

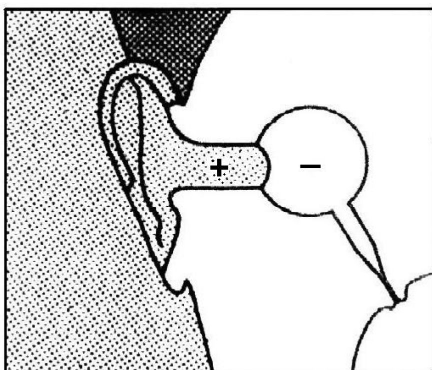


Fig. 2.7. Înainte de efectuarea manevrei de echilibrare a urechii medii, trompa lui Eustache este închisă.

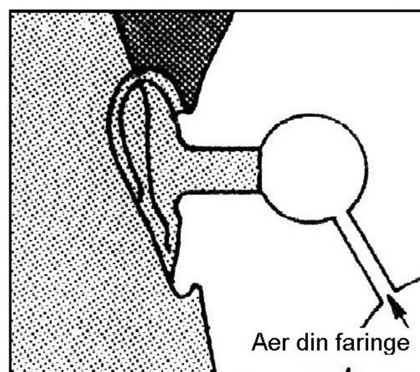


Fig. 2.8. În timpul efectuării manevrei de echilibrare a urechii medii, trompa lui Eustache se deschide.

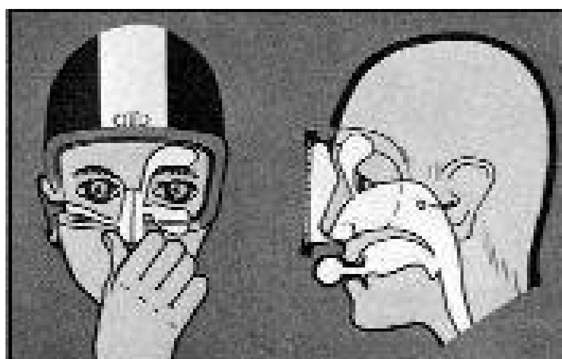


Fig. 2.9. Manevra Valsalva pentru echilibrarea presiunii din urechea medie şi din sinusuri.

• **Modificări ale lucrului mecanic respirator**

Curentul de aer sau de amestec de gaze care apare la inspiraţie şi la expiraţie este supus unei frânări pe întregul traseu al căilor respiratorii (nas, faringe, laringe, trahee, bronhii, bronhiole). Această frânare se datorează disipării energiei curentului de aer în lungul reţelei bronhopulmonare care se constituie într-o rezistenţă aeraulică. Energia disipată este compensată prin lucrul mecanic respirator. La scafandri, circuitul aparatului de respirat sub apă adaugă o rezistenţă aeraulică suplimentară celei datorate căilor respiratorii ale aparatului respirator pulmonar.

Frânarea curentului de amestecuri gazoase în timpul respiraţiei creşte considerabil cu creşterea presiunii (adâncimii de scufundare) deoarece, prin creşterea presiunii aerului sau amestecului respirator respirat din aparat, creşte şi densitatea acestuia. Aceasta conduce la creşterea lucrului mecanic al muşchilor respiratori, necesar învingerii rezistenţelor aeraulice şi deci acoperirii energiei disipate (pierderii de sarcină).

Organismul scafandrului antrenat se adaptează la o respiraţie cu economie de efort, caracterizată printr-o creştere a amplitudinii respiratorii şi implicit a volumului curent şi printr-o scădere a frecvenţei respiratorii.

2.1.1.2. Acțiunea presiunii asupra volumelor gazoase abdominale

În timpul coborârii scafandrului în apă, datorită creşterii corespunzătoare a presiunii, volumele de gaze conținute în intestine şi stomac scad.

În timpul urcării scafandrului către suprafață, presiunea scăzând, volumele gazoase abdominale cresc din nou, revenind la volumele de dinaintea scufundării.

2.1.2. ACCIDENTELE FIZICO - MECANICE (BAROTRAUMATISMELE)

Accidentele fizico-mecanice sunt accidentele datorate efectelor mecanice ale presiunii şi afectează teritoriul plămânilor şi al cavităților pneumatice anexe (urechea medie şi sinusurile), precum şi tubul digestiv, având drept cauză variațiile de volum ale gazelor aflate în cavitățile organismului, determinate de variațiile de presiune (fig. 2.10).

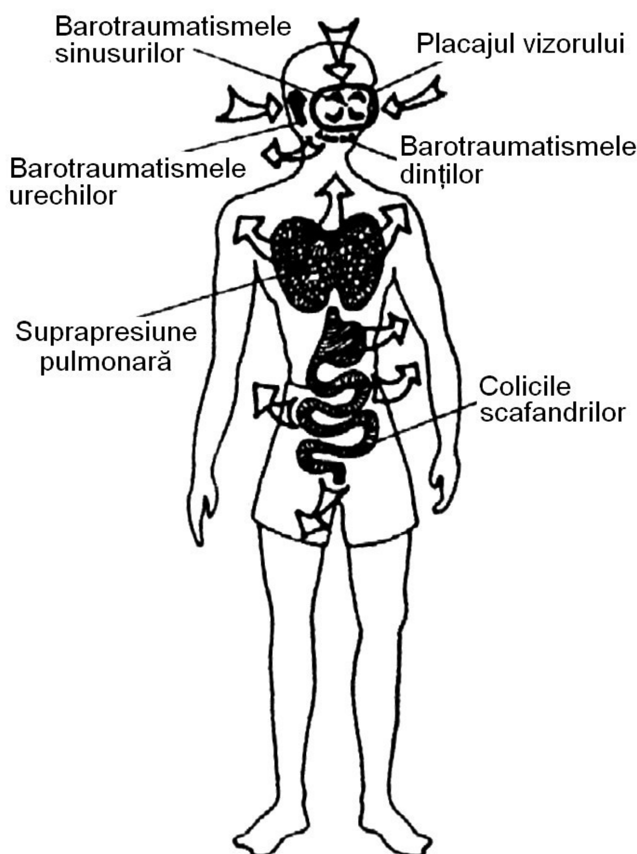


Fig. 2.10. Accidentele fizico-mecanice (barotraumatismele).

2.1.2.1. Suprapresiunea pulmonară

Suprapresiunea pulmonară este un accident de scufundare ce apare datorită destinderii gazelor blocate în plămâni peste limita de elasticitate a acestora, în timpul ridicării scafandrului către suprafața apei.

a) Descrierea accidentului de suprapresiune pulmonară

Deşi în scufundare este o regulă menținerea continuă a jocului inspirației şi expirației în timpul urcării la suprafață, ea poate să nu fie respectată în cazurile extreme, când panica pune stăpânire pe scafandru. În ciuda tuturor consemnelor, unii scafandri

îşi opresc respiraţia, împiedicând expiraţia (în unele cazuri în mod voluntar, în alte cazuri în mod reflex printr-un spasm al glotei produs de spaimă), ceea ce conduce la creşterea rapidă a volumului gazelor conţinute în plămâni o dată cu scăderea presiunii (adâncimii). Continuând urcarea către suprafaţa apei, volumul gazelor din plămâni creşte atât de mult încât depăşeşte volumul maxim al alveolelor şi, învingând limita lor de elasticitate, conduce la ruperea acestora. De aici, apariţia printre altele a unui pneumotorax spontan, adesea sufocant şi a emboliei gazoase în circulaţia pulmonară. Accidentul este cu atât mai grav cu cât blocarea expiraţiei se produce mai aproape de suprafaţa apei, acolo unde scăderile de adâncime conduc la variaţii mari de volum.

Consecinţele suprapresiunii pulmonare sunt:

• *Embolia gazoasă*, care este cea mai gravă consecinţă a suprapresiunii pulmonare. Cu sau fără ruperea alveolelor pulmonare ("explozia" plămânului), o presiune de aproximativ 1,2 m coloană de apă poate împinge aerul din alveolele pulmonare în vasele de sânge care le înconjoară. Odată ajuns în sânge, aerul este transportat la inimă, iar de aici este trimis prin artere în tot corpul. O parte din aer va ajunge în mod sigur în arterele care alimentează creierul. Aici, orice bulă de gaz care este mai mare decât o hematie, se poate înţepeni într-un vas de sânge. Ea va forma un dop, "embolus", care nu va permite sângelui să treacă mai departe prin acel vas. Ţesutul creierului, din zona aferentă vaselor de sânge de după dopul gazos, nu va mai fi irigat. Acest ţesut nu va putea să reziste neoxigenat mai mult de câteva minute fără a suferi leziuni ireversibile. Un scafandru care a suferit o embolie gazoasă îşi poate pierde cunoştinţa fie înainte de revenirea la suprafaţă, fie la câteva minute după ieşirea din apă. De asemenea, există posibilitatea de a se produce o embolie redusă cu simptome limitate, însă acesta este un caz foarte rar întâlnit.

• *Emfizemul mediastinal*, care este tot o consecinţă a suprapresiunii pulmonare, dar mai puţin serioasă decât embolia gazoasă. Acesta constă în aceea că aerul este împins în spaţiile cu ţesut din mijlocul toracelui, între plămâni, lângă inimă şi de-a lungul traheii. Simptomele caracteristice sunt: dureri toracice, tulburări respiratorii şi leşin datorită presiunii aerului asupra inimii.

• *Emfizemul subcutanat*, care este tot o consecinţă a suprapresiunii pulmonare, dar mai puţin importantă ca embolia gazoasă şi care constă în existenţa de aer sub piele, în special în jurul gâtului. În acest caz, simptomele sunt: tulburări respiratorii, edem şi chiar schimbarea vocii.

• *Pneumotoraxul*, care este o consecinţă importantă a suprapresiunii pulmonare, dar mai puţin gravă ca embolia gazoasă. Pneumotoraxul constă în pătrunderea aerului între plămâni şi peretele cavităţii toracice, în cavitatea pleurală. Acest lucru va face ca plămânul afectat să-şi reducă volumul, cel puţin în parte, ceea ce va afecta respiraţia. Dacă presiunea creşte, aceasta va afecta nu numai plămânul, ci şi inima reducând activitatea cardiacă. Simptomele constau tot din dureri în piept şi dificultăţi respiratorii.

b) Primul ajutor în cazul emboliei gazoase

După cum s-a arătat, simptomele specifice emboliei gazoase pot apărea chiar în timpul ridicării sau după câteva momente după ieşirea scafandrului la suprafaţa apei. Înainte de a-şi pierde cunoştinţa, victima unei embolii gazoase poate avea simptome ca: mişcări necoordonate, ameţeli, paralizie, tulburări de vedere şi vorbire, dureri în piept, sânge în gură, convulsii şi întreruperea respiraţiei.

Imediat ce există bănuiala că un scafandru ar putea fi victima unei embolii gazoase, acestuia trebuie să i se acorde primul ajutor, după care trebuie recomprimat într-o barocameră. Nu se recomandă recomprimarea victimei direct în apă deoarece simptomele sunt prea severe pentru a permite un tratament adecvat în apă.

Primul ajutor în cazul emboliei gazoase constă în:

– se culcă scafandrul accidentat pe spate, înclinat puțin spre stânga, cu capul mai jos decât picioarele, pentru a micşora posibilitatea ca bulele de gaz rămase în sistemul circulator să ajungă la creier;

– se efectuează victimei respirația "gură la gură", numai dacă este necesar;

– se administrează scafandrului oxigen;

– se protejează victima contra şocurilor;

– se transportă victima de urgență la cea mai apropiată barocameră pentru recompresie.

Transportul scafandrului, care a suferit o embolie gazoasă, cu avionul sau cu elicopterul, este justificat numai dacă aceasta conduce la o reducere substanțială a timpului de transport, iar în acest caz, expunerea la presiunea scăzută din timpul zborului trebuie redusă la minimum.

c) Tratamentul accidentului de suprapresiune pulmonară

În ceea ce priveşte tratamentul de urgență a accidentului de suprapresiune pulmonară cu consecințele ei, acesta este exclusiv hiperbar, prin recomprimarea rapidă, în barocameră (fig. 2.11), a scafandrului având simptomele acestui accident, la o presiune cu 1 bar mai mare decât presiunea de expunere în apă (corespunzătoare adâncimii atinse de scafandru), fără a depăşi presiunea de 5 bar (sc. man.). Tratamentul hiperbar trebuie completat cu o intervenție medicamentoasă şi eventual chirurgicală.

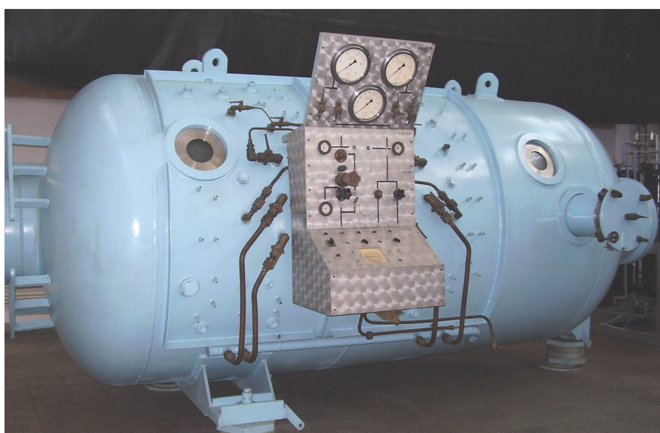


Fig. 2.11. Barocameră pentru tratarea accidentelor de scufundare.

d) Măsuri de prevenire a apariției accidentului de suprapresiune pulmonară

Accidentul de suprapresiune pulmonară, prin consecințele sale, fiind unul din accidentele de scufundare cele mai grave, trebuie evitat cu orice preț. Astfel, evitarea apariției suprapresiunii pulmonare se face controlând în permanență libera expirație în timpul urcării către suprafața apei. Este important ca în timpul efectuării unei scufundări, pe perioada ridicării la suprafață, scafandrul să lupte împotriva tendinței de a-şi ține respirația atunci când se află într-o situație critică, de panică. Pe toată durata urcării la suprafață, scafandrul trebuie să respire în mod normal şi să expire în mod continuu.

Expirația surplusului de aer ce apare în timpul urcării trebuie efectuată chiar şi atunci când urcarea la suprafață se execută liber, scafandrul nemaiavând detentorul în gură.

De aceea, în timpul învățării tehnicilor de scufundare, este absolut necesar să se insiste asupra consecințelor şi pericolelor apariției suprapresiunii pulmonare. Totodată, pentru o mai bună însuşire a tehnicilor specifice evitării apariției suprapresiunii pulmonare, programul de învățare trebuie să conțină exerciții şi antrenamente specifice.

2.1.2.2. Barotraumatismele urechii medii

Barotraumatismele sunt accidente de scufundare aparţinând categoriei accidentelor fizico-mecanice şi apar ca urmare a dezechilibrului de presiune dintre presiunea gazului existent în cavitățile pneumatice anexe ale aparatului respirator (urechea medie şi sinusurile) şi presiunea exterioară (presiunea mediului acvatic la adâncimea de imersie).

Urechea medie este o cavitate pneumatică aflată între timpan şi trompa lui Eustache. Trompa lui Eustache face legătura între urechea medie şi faringe şi este, de obicei, închisă.

Atunci când începe scufundarea, cavitatea pneumatică care constituie urechea medie, conține aer la presiunea atmosferică. O dată cu începerea coborârii, datorită creşterii presiunii exterioare, apare un dezechilibru între presiunile care acționează de o parte şi de alta a timpanului şi anume între presiunea mediului acvatic exterior care creşte cu adâncimea şi presiunea aerului din urechea medie care rămâne practic la valoarea presiunii atmosferice. În condițiile în care trompa lui Eustache este închisă, aceeaşi diferență de presiune există şi între presiunea aerului din faringe (scafandrul respiră aer la o presiune egală cu presiunea corespunzătoare adâncimii de imersie) şi presiunea aerului din urechea medie. În plus, aceeaşi diferență de presiune operează şi la nivelul fiecărui vas de sânge din mucoasa ce căptuşeşte urechea medie, deoarece presiunea din sânge creşte o dată cu creşterea presiunii exterioare care se transmite prin corp la sânge.

Înainte ca diferența de presiune să devină foarte mare, trebuie introdus aer sau amestec de gaze din faringe în urechea medie prin trompa lui Eustache, egalizând astfel presiunile de o parte şi alta a timpanului. Însă, trompa lui Eustache nu permite întotdeauna trecerea uşoară a aerului sau amestecului respirator dinspre faringe către urechea medie. Deschiderea trompei, în vederea echilibrării presiunii, se poate realiza fie prin deglutiție (înghițire sau o simulare de înghițire a salivei), fie prin mişcarea maxilarelor. Dar cea mai eficientă metodă de echilibrare este manevra Valsalva care constă în strângerea nasului între degete şi suflarea de aer sau amestec gazos în nas pentru a forța aerul sau amestecul de gaze din faringe să deschidă trompa lui Eustache şi să pătrundă prin ea către urechea medie. În afară de manevra prin deglutiție şi manevra Valsalva, mai există şi alte manevre de echilibrare a presiunii din urechea medie cu presiunea exterioară. În tabelul 2.1 sunt prezentate tipurile de manevre şi tehnicile specifice care pot fi efectuate pentru echilibrarea presiunilor de pe cele două fețe ale timpanului.

Răceala, infecțiile sau febra duc la inflamarea mucoasei din jurul trompei, conducând la dificultăți de deschidere a trompei şi deci de echilibrare a presiunii din urechea medie. Utilizarea picăturilor pentru nas cu efect vasoconstrictiv poate reduce inflamația, uşurând echilibrarea urechii dar, atunci când dispare efectul acestor medicamente, dificultatea echilibrării devine chiar mai mare decât înainte. De aceea, atunci când apar astfel de probleme este recomandabil să nu se efectueze scufundări.

Tabelul 2.1

Manevre pentru echilibrarea urechii

Tipul manevrei	Tehnica de echilibrare specifică
1. Manevra de echilibrare prin deglutiție	Se realizează prin deglutiție (înghițire) sau o simulare de deglutiție a salivei. Aceasta permite deschiderea trompei lui Eustache şi echilibrarea presiunilor de pe cele două fețe ale timpanului.
2. Manevra Valsalva	Se realizează prin suflare de aer sau amestec gazos către nas, nările fiind presate cu degetele şi gura ănchisă. Suflarea de aer sau amestec gazos se face dinspre plămâni printr-o simulare de expirație.
3. Manevra Frenzel	Permite insuflarea de aer sau amestec gazos către trompa lui Eustache fără a efectua o expirație dinspre plămâni. Manevra este independentă de respirație, scurtcircuitând aerul sau amestecul de gaze toracic la nivelul glotei şi nu afectează sistemul cardiovascular. În practică: glota blocată, nările presate, baza limbii ridicată înspre spate, se încearcă un început de deglutiție şi se emite sunetul "Ke".
4. Manevra "deschidere tubară voluntară"	Se obține printr-un antrenament muscular progresiv al trompei lui Eustache. În practică: se încearcă reconstituirea voluntară a poziției muşchilor faringelui ca la manevrele Valsalva sau Frenzel, din timpul deschiderii trompei. Prin concentrare ăi fără ajutorul unei presiuni asociate, se caută să se mențină deschiderea tubară până la echilibrarea presiunii din ureche.
5. Manevra Toynbee	Este utilizată în timpul urcării către suprafață, atunci când axistă posibilitatea ca presiunea din urechea medie să devină superioară presiunii exterioare. În practică, se efectuează o simulare de inpirație, nasul fiind cu nările presate, iar gura închisă. De obicei, echilibrarea presiunii la urcarea către suprafață se realizează în mod automat. Manevra Toynbee se va utiliza numai atunci când echilibrarea nu se realizează automat.

În cazul unei coborâri rapide, care crează diferențe de presiune ce depăşesc 120 mbar (0,120 bar), se produce blocajul trompei lui Eustache şi orice manevre ale scafandrului de a-şi echilibra presiunea urechii devin inutile. În acest caz, se recomandă ca scafandrul să urce câțiva metri şi apoi să reînceapă manevrele de egalizare a presiunii din urechea medie cu presiunea ambiantă.

a) Descrierea barotraumatismelor urechii medii

Dacă echilibrarea urechii medii nu reuşeşte şi se continuă totuşi coborârea în apă, atunci vor apărea accidentele mecanice din categoria barotraumatismelor urechii. În continuare, se va prezenta pe scurt modul în care apar şi se dezvoltă barotraumatismele urechii în cazul în care nu se reuşeşte echilibrarea presiunii din urechea medie.

Vasele de sânge din țesutul care căptușește urechea medie şi cele de pe fața internă a timpanului sunt primele care vor fi afectate de existența dezechilibrului de presiune. Aceste vase de sânge nu pot rezista la o diferență prea mare între presiunea sângelui din interior şi presiunea mai mică existentă în urechea medie. Funcție de valoarea diferenței de presiune (care este funcție de variația de adâncime) şi de timpul cât aceasta acționează (până în momentul echilibrării presiunilor), vasele se vor umfla până la limita lor de elasticitate şi în final se vor sparge. Astfel, vor apărea hemoragii în mucoasă, iar apoi în spațiul din urechea medie.

Timpanul va sângera fără a se rupe neapărat. De multe ori, cantitatea de sânge care se adună în urechea medie, este destul de importantă, reducând volumul de aer prin comprimarea acestuia. Aceasta va avea ca efect o egalizare a presiunii din urechea medie cu presiunea exterioară, ferind astfel timpanul de rupere. Acest proces de echilibrare nu este recomandat să aibă loc.

Sensibilitatea timpanului este variabilă de la individ la individ. La scufundare, ca regulă generală, timpanul poate suporta, fără să sufere, o diferență de presiune între exterior şi cavitatea urechii medii de până la 300 mbar (0,3 bar), ceea ce corespunde unei creşteri de adâncime de circa 3 m. Peste această diferență de presiune, timpanul devine concav către exterior, tinzând să se rupă şi devine dureros.

Egalizarea prin hemoragie produce o acumulare de sânge în urechea medie care împreună cu afecțiunile membranei interioare pot conduce la infecții şi la pierderea auzului.

Apariția durerilor şi continuarea acestora după scufundare, ca de altfel şi apariția de scurgeri de lichid din urechea medie, indică existența unei infecții. De asemenea, apariția de sânge în secreția nazală sau în cavitatea bucală este explicabilă în cazul unui astfel de accident, deoarece sângele din urechea medie se elimină prin trompa lui Eustache către faringe.

Ruperea timpanului în apă rece poate avea efecte şi mai serioase. Apa rece care pătrunde în urechea medie cauzează o deteriorare violentă a simțului echilibrului ducând la stări grave de amețeală (vertij) şi greață.

Vertijul trece, de obicei, de îndată ce apa se încălzeşte în interiorul urechii (după aproximativ un minut). În acest caz, se recomandă păstrarea pe cât posibil a unui ritm respirator normal până când simptomele încetează.

Tulburările de echilibru pot apărea şi în timpul ridicării către suprafața apei şi poartă denumirea de vertij alternobaric. Acesta se datorează presiunilor anormale din urechea medie care au un efect asupra structurilor adiacente din urechea internă. Acest fenomen apare în timpul urcării către suprafață, mai ales după o coborâre marcată de dificultăți de egalizare a presiunii din urechea medie şi este însoțit de simptome asemănătoare celor specifice vertijului. Atunci când apar astfel de simptome, se recomandă oprirea ridicării pentru câteva minute, ca apoi să fie continuată în ritm lent.

În timpul ridicării către suprafață, aerul sau amestecul de gaze din urechea medie trebuie să părăsească urechea medie trecând în sens invers către faringe prin trompa lui Eustache. Această nouă echilibrare a presiunii se realizează de obicei spontan, fără să necesite manevre speciale.

b) Tratamentul barotraumatismelor urechii

Imediat ce apare un accident de scufundare mecanic din categoria barotraumatismelor urechii, victima trebuie îndrumată imediat la un medic ORL care îi va aplica un tratament medicamentos corespunzător sau, dacă este cazul, un tratament chirurgical adecvat.

Trebuie acordată o importanţă mare infecţiilor care pot apărea în cazul unui astfel de accident. Fără infecţie, un timpan rupt se poate vindeca foarte bine. În cazul apariţiei unei infecţii situaţia devine mai complicată, necesitând un tratament şi o urmărire medicală mult mai serioasă.

De aceea, atunci când apar simptome ca slăbirea auzului, ţiuit în urechi, dureri de urechi, scurgeri lichide din nas şi din gură, sânge în secreţia nazală şi în cavitatea bucală, scafandrul care a fost victima unui astfel de accident trebuie să se prezinte imediat la un medic specialist în medicină hiperbară sau, dacă acest lucru nu este posibil, la un medic specialist ORL.

c) Măsuri de prevenire a barotraumatismelor urechii

Pentru evitarea apariţiei unui accident din categoria barotraumatismelor urechii medii, se impune ca necesară realizarea unei corecte echilibrări a urechii medii prin deglutiţie sau prin manevra Valsalva. Este recomandabil să se efectueze echilibrarea urechii medii înaintea apariţiei primelor dureri. Manevrele de echilibrare a urechilor trebuie începute chiar de la debutul scufundării pentru a obişnui aceste organe cu o astfel de gimnastică.

Atunci când, în timpul coborârii către adâncimea de lucru, apar uşoare dureri ale urechii care semnifică neechilibrarea corespunzătoare a acesteia, scafandrul va trebui să urce puţin până la dispariţia durerilor şi apoi să înceapă sau să reînceapă efectuarea manevrelor de echilibrare.

De asemenea, atunci când, în timpul coborârii sub apă, scafandrul constată că nu-şi poate echilibra urechile cu toate manevrele pe care le-a încercat, se recomandă să nu se insiste în încercarea de echilibrare a urechilor şi să se renunţe la scufundare.

Totodată, atunci când scafandrul este răcit, sau când are o rinită acută, acesta trebuie să renunţe la orice fel de scufundare până la vindecare. Folosirea de picături pentru nas cu scop vasoconstrictiv nu este o soluţie, deoarece acestea au efect pentru un timp foarte scurt.

2.1.2.3. Barotraumatismele sinusurilor

Sinusurile sunt, de asemenea, nişte cavităţi pneumatice anexe ale aparatului respirator, aflate în interiorul oaselor feţei şi ale cutiei craniene. Există patru perechi de sinusuri şi anume: sinusurile frontale, situate deasupra sprâncenelor, sinusurile maxilare, situate în maxilarul superior, sinusurile etmoidale, plasate între ochi şi sinusurile sfenoidale, aflate sub creier. Sinusurile mai importante din punct de vedere al mărimii lor sunt sinusurile frontale şi maxilare. Sinusurile sunt căptuşite în interior cu o mucoasă care o continuă pe cea nazală şi comunică, prin intermediul unor canale osoase, cu fosele nazale care la rândul lor comunică cu faringele.

Ca şi în cazul urechii medii, în timpul coborârii sub apă, sinusurile trebuie umplute cu aer sau amestec respirator din fosele nazale în vederea echilibrării presiunii pentru a preveni o comprimare care poate fi dureroasă. De obicei, echilibrarea presiunii din sinusuri se face în mod spontan fără să fie necesară vreo manevră de egalizare.

a) Descrierea barotraumatismelor sinusurilor

Dacă, din diferite motive, mucoasa se inflamează în interiorul unui canal ce realizează comunicarea sinusului cu fosele nazale, se poate produce o închidere

completă a canalului şi o izolare totală a sinusului respectiv. Acest lucru se poate întâmpla în cazul unei răceli şi poate duce la imposibilitatea egalizării presiunii din sinusuri cu presiunea exterioară.

Diferențele de presiune ce apar în timpul coborârii, între presiunea exterioară şi presiunea aerului sau amestecului de gaze din sinusurile obstruate, provoacă dureri puternice frontale şi maxilare care pot declanşa hemoragii sau hematoame în interiorul sinusurilor. Pentru a descongestiona mucoasa din interiorul canalelor care leagă sinusurile cu fosele nazale, în cazul unei răceli sau sinuzite, unii scafandrii folosesc picături pentru nas (Fedrocaină, Bixtonim, Rinofug), reuşind astfel deschiderea conductelor sinusurilor. Se poate însă întâmpla ca efectul acestor soluții pentru instilații nazale să treacă prea repede, conducând la apariția de probleme mult mai serioase.

De aceea, se recomandă cu insistență să nu se efectueze scufundări atunci când scafandrul este răcit sau atunci când are o sinuzită. Atunci când scafandrul, având o răceală sau o sinuzită, forțează echilibrarea sinusurilor nazale, s-ar putea ca la un moment dat el să reuşească acest lucru şi prima parte a scufundării se va petrece normal. Dar, în timpul urcării la suprafață, aerul sau amestecul gazos comprimat conținut în sinusuri va refuza să iasă din sinusuri prin canalele care sunt din nou astupate, provocând dureri foarte mari. Simptomele care apar datorită dificultăților de echilibrare a sinusurilor sunt: dureri în zona respectivă şi eliminare de sânge pe nas.

b) Tratamentul în cazul barotraumatismelor sinusurilor

Ca şi în cazul barotraumatismelor urechii, scafandrul care a fost victimă a unui astfel de accident, trebuie îndrumat imediat către un medic specialist în medicină hiperbară sau, dacă acest lucru nu este posibil, către un doctor specialist ORL, care îl va consulta şi îi va aplica un tratament medicamentos specific sau, dacă este cazul, un tratament chirurgical corespunzător.

c) Măsuri de prevenire a barotraumatismelor sinusurilor

Măsura cea mai rațională pentru prevenirea apariției accidentelor mecanice din categoria barotraumatismelor sinusurilor, constă în evitarea efectuării de scufundări atunci când scafandrul este răcit, dar mai ales atunci când scafandrul suferă de o sinuzită netratată. În astfel de situații, scafandrul trebuie mai întâi să-şi vindece răceala sau sinuzita şi apoi să încerce să efectueze din nou scufundări, dar cu prudență, urmărind dacă poate efectua echilibrări corespunzătoare ale sinusurilor.

Nu se recomandă folosirea picăturilor pentru nas deoarece, aşa cum s-a mai arătat, efectul lor poate fi de foarte scurtă durată, pentru ca imediat după dispariția efectului lor manevra de echilibrare a sinusurilor să devină şi mai dificilă, iar probabilitatea de apariție a unor barotraumatisme ale sinusurilor să crească considerabil.

De aceea, atunci când în timpul coborârii scafandrul constată că nu poate echilibra unul sau mai multe sinusuri, el trebuie să renunțe la scufundare şi să se prezinte la un medic specialist pentru a vedea care este motivul dificultăților de echilibrare.

2.1.2.4. Colicile scafandrilor

Colicile scafandrilor fac parte din categoria accidentelor de scufundare care sunt cauzate de tendința de creştere a volumului gazelor conținute în tubul digestiv în timpul ridicării către suprafața apei (scăderea presiunii ambiante).

a) Descrierea colicilor scafandrilor

Datorită fermentației digestive şi înghițirii de aer sau amestecul de gaze în timpul scufundării, în stomac şi intestine se poate acumula o anumită cantitate de gaze. În timpul coborârii, gazele din stomac şi intestine sunt comprimate fără vreun efect negativ. Dacă, la adâncime, gazele continuă să se formeze şi scafandrul continuă să înghită aer sau amestec de gaze, cantitatea de gaze acumulată în tubul digestiv creşte şi, în timpul ridicării la suprafață, îşi vor mări volumul, destinzându-se.

Creşterea volumelor de gaze din tubul digestiv va destinde pereții stomacului sau intestinelor provocând crampe abdominale numite *colicile scafandrilor*. Aceste dureri abdominale sunt însoțite de eructații şi chiar de dificultăți de respirație.

b) Tratamentul colicilor scafandrului

În cazul în care, în timpul urcării la suprafață, scafandrul constată apariția primelor simptome ale colicilor scafandrului, pentru a nu risca ruperea tubului digestiv, cu complicații specifice, scafandrul va trebui să coboare la o adâncime la care colicile încetează şi, prin mişcări sau masaje, va încerca eliminarea gazelor prin eructații şi flaturări voluntare, după care va continua urcarea în ritm lent.

Tratarea colicilor scafandrului, după ieşirea la suprafață, se va face prin administrarea unor antispasmotice şi prin expulzări naturale ale gazelor, nefiind întotdeauna necesară recompresia accidentatului.

c) Măsuri pentru evitarea apariției colicilor scafandrului

Pentru preîntâmpinarea apariției eventualelor colici, scafandrii trebuie să respecte un regim alimentar adecvat care să nu cuprindă alimente care produc gaze în timpul digestiei. Scafandrii trebuie să respecte, de asemenea, interdicția de a efectua scufundări la mai puțin de două ore după o masă consistentă.

Pentru a limita înghițirea de aer sau de alte amestecuri de gaze în timpul scufundării, scafandrii trebuie să evite înghițirea de aer sau de gaze respiratorii în timpul mişcărilor de deglutiție efectuate în timpul echilibrării urechilor, sau să utilizeze manevra de echilibrare Valsalva.

2.1.3. EFECTELE BIOFIZICE ALE PRESIUNII

Efectele biofizice ale presiunii se referă la fenomenele de dizolvare şi degajare a gazelor în şi respectiv din țesuturile corpului omenesc, în timpul coborârii scafandrului în apă şi respectiv în timpul urcării către suprafață.

2.1.3.1. Efectele biofizice ale presiunii în timpul coborârii sub apă (compresiei)

Pentru o mai bună înțelegere a efectelor biofizice ale presiunii în timpul compresiei, se va considera că scafandrul respiră aer. Astfel, în cazul scufundării cu aer, înainte de a intra sub apă, scafandrul respiră aer la o presiune egală cu presiunea atmosferică, 1 bar (sc. abs.). La această presiune a aerului respirat, presiunile parțiale ale oxigenului şi azotului sunt: $p_{O_2} = 0{,}21$ bar (sc. abs.) şi $p_{N_2} = 0{,}79$ bar (sc. abs.). Țesuturile scafandrului pot fi considerate ca nişte lichide saturate cu azotul dizolvat în ele. În ceea ce priveşte oxigenul, acesta se dizolvă într-o cantitate foarte mică în țesuturi, reacțiile sale din organism fiind de altă natură.

În continuare, se consideră că scafandrul coboară la o anumită adâncime. Presiunea totală a aerului alveolar creşte şi deci cresc şi presiunile parțiale ale componentelor gazoase ale aerului (oxigenul şi azotul).

Deoarece oxigenul se consumă în cadrul proceselor metabolice, din punct de vedere al fenomenelor de dizolvare şi degajare a gazelor în țesuturi, interesează numai dizolvarea şi degajarea gazului inert aflat în aerul respirat adică, în cazul de față, a azotului.

Inițial, tensiunea gazului inert (în cazul de față a azotului) dizolvat rămâne la valoarea pe care o avea la presiunea atmosferică.

În fiecare moment, inima trimite către alveolele pulmonare o anumită cantitate de sânge care intră în contact cu aerul alveolar. Aici are loc o dizolvare a azotului din aerul alveolar în sânge până când tensiunea azotului dizolvat atinge valoarea presiunii parțiale a azotului din aerul alveolar. În circa trei minute, întregul sânge din corp este *saturat* cu azotul dizolvat corespunzător presiunii ambiante.

În continuare, acest sânge, saturat cu azotul dizolvat în el, va iriga diferitele țesuturi ale organismului. În acest mod, țesuturile organismului uman încep să se încarce cu azot, după o lege exponențială, până la saturație. Unele țesuturi se saturează mai repede cu azotul dizolvat în ele (câteva minute), iar altele se saturează într-un timp mai îndelungat (câteva ore).

Indiferent de valoarea presiunii ce corespunde adâncimii de scufundare, după circa 12 ore se poate considera că toate țesuturile organismului, chiar şi cele mai lente, sunt saturate cu azot, ceea ce înseamnă că tensiunea azotului dizolvat este aproximativ egală cu presiunea parțială a azotului din aerul aflat în alveolele pulmonare.

Dacă scufundarea la o anumită adâncime, corespunzătoare unei anumite presiuni, durează mai puțin de 12 ore, numai țesuturile care permit o dizolvare mai rapidă a azotului vor fi complet saturate. Celelalte țesuturi, mai lente, vor avea azot dizolvat în ele la tensiuni mai mici decât tensiunea corespunzătoare saturației, deci mai mici decât presiunea parțială a azotului alveolar.

Pentru clarificarea fenomenului de dizolvare a gazului inert (în cazul prezentat a azotului) în țesuturi şi de saturare a acestora cu gazul inert, în continuare, se prezintă un exemplu având la bază o reprezentare sugestivă a lui H. R. Schreiner. Astfel, se consideră un scafandru care respiră aer şi care a pătruns în apă la o adâncime de 30 m. La această adâncime presiunea este de 4 bar (sc. abs.). Schreiner a reprezentat schematic fenomenul de dizolvare a azotului într-un țesut al organismului scafandrului (fig. 2.12). În această schemă, în compartimentul din stânga se află aerul alveolar ce conține azot, iar în compartimentul din dreapta se află țesutul considerat. Între ele, reprezentată în mod simplificat cu linie punctată, se află, membrana alveolară la nivelul căreia se face schimbul de gaze.

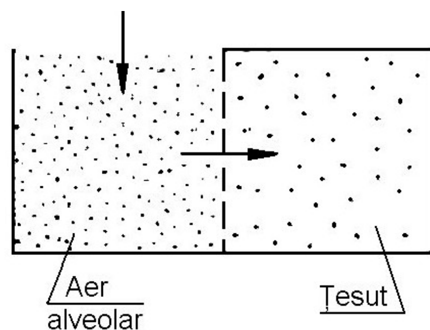


Fig. 2.12. Schema lui Schreiner privind dizolvarea azotului în țesuturi.

Aflat la adâncimea de 30 m, scafandrul va respira aer la o presiune egală cu presiunea corespunzătoare adâncimii de imersie, adică va respira aer la 4 bar (sc. abs.). Prin urmare, deoarece aerul are circa 80% azot ($r_{N_2} = 0{,}8$), presiunea parțială a azotului din aerul alveolar va fi $P_{N_2} = 0{,}8 \cdot 4 = 3{,}2$ bar (sc. abs.). Inițial, în țesutul considerat, se află azotul dizolvat în mod obişnuit la presiunea atmosferică. Tensiunea inițială a azotului dizolvat este $p_{N_2,in} = 0{,}8 \cdot 1 = 0{,}8$ bar (sc. abs.)

Prin mecanismul prezentat mai sus, începe dizolvarea, prin intermediul sângelui, a azotului în țesuturi datorită diferenței dintre presiunea parțială a azotului din aerul alveolar, P_{N_2} şi tensiunea azotului dizolvat în respectivul țesut, p_{N_2} ($\Delta p = P_{N_2} - p_{N_2}$) (fig. 2.13). Fenomenul de dizolvare a azotului în țesut are loc după o lege exponențială pornind de la valoarea inițială a tensiunii azotului dizolvat în țesuturi, $p_{N_2,in}$, şi continuând până când tensiunea azotului dizolvat în țesutul respectiv, p_{N_2} devine aproximativ egală cu presiunea parțială a azotului alveolar, P_{N_2}. În exemplul considerat, se poate aprecia că țesutul se saturează cu azot după circa 4 ore.

În cazul utilizării unor amestecuri respiratorii azot-oxigen (NITROX), heliu--oxigen (HELIOX), heliu-azot-oxigen (TRIMIX), hidrogen-oxigen (HIDROX) sau hidrogen-heliu-oxigen (HIDRELIOX), fenomenul dizolvării gazelor inerte în țesuturile scafandrului în timpul compresiei este acelaşi din punct de vedere calitativ ca şi în cazul utilizării aerului ca amestec respirator.

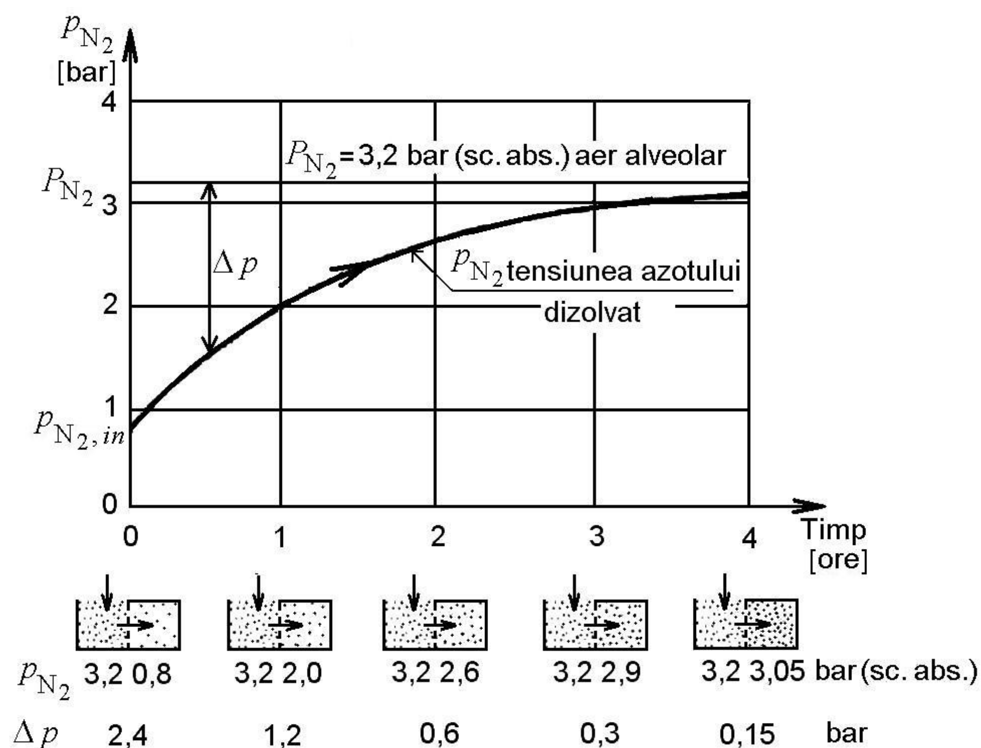


Fig. 2.13. Dizolvarea azotului într-un țesut al unui scafandru care respiră la adâncimea de 30 m.

2.1.3.2. Efectele biofizice ale presiunii în timpul urcării către suprafață (decompresiei)

Şi în acest caz, pentru exemplificare, vom considera că scafandrul respiră aer. Astfel, la urcarea către suprafața apei presiunea ambiantă scade, scăzând în acelaşi timp şi presiunea aerului alveolar. Prin urmare, va scădea şi presiunea parțială a azotului din aerul alveolar, de la valoarea inițială $P_{N_2,in}$ de la sfârşitul compresiei la valoarea finală $P_{N_2,f}$ rezultată ca urmare a decompresiei (fig. 2.14). Presiunea parțială a azotului alveolar $P_{N_2,f}$ poate fi valoarea la sfârşitul decompresiei sau valoarea la sfârşitul unui palier de decompresie. În acelaşi timp, tensiunea gazului dizolvat, p_{N_2} nu scade imediat, apărând astfel o diferență de presiune, $\Delta p = P_{N_2,f} - p_{N_2}$, negativă care exprimă starea de *suprasaturație*. Sângele este primul care se *desaturează,* iar în continuare şi celelalte țesuturi ale organismului se desaturează cu o viteză mai mare sau mai mică.

Fenomenul de eliminare a azotului din țesuturi (de desaturare a țesuturilor) se petrece după o curbă exponențială simetrică cu cea de dizolvare a azotului în țesuturi în faza de compresie (fig. 2.14).

În programul de decompresie pe care scafandrul trebuie să-l urmărească cu strictețe în timpul urcării către suprafață, important este ca *raportul de suprasaturație*, $p_{N_2}/P_{N_2,f}$, să nu depăşească o valoare critică de ordinul de mărime 2. Dacă acest raport critic este depăşit, degajarea azotului din sânge şi țesuturi se produce cu apariția de bule de azot care pot duce la instalarea unui accident grav de decompresie. În acest caz, în corpul omenesc se produce un fenomen de degajare a azotului sub formă de bule, asemănător cu fenomenul care apare la deschiderea unei sticle de şampanie (deschiderea dopului sticlei de şampanie făcându-se într-un timp extrem de scurt, apare un fenomen puternic de degajare, cu apariție de bule, a gazului dizolvat în lichidul aflat în sticlă).

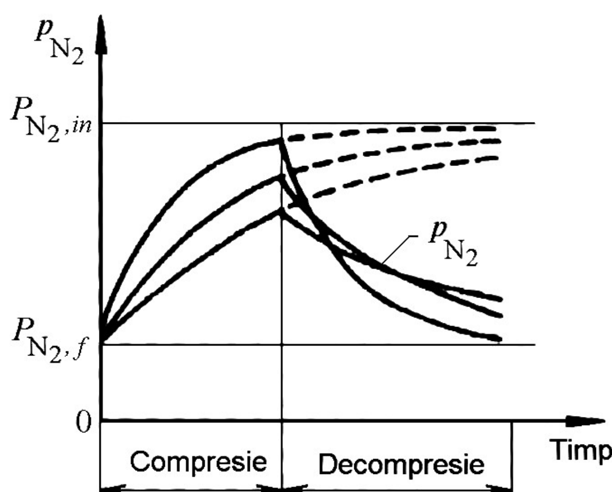


Fig. 2.14. Dizolvarea şi eliminarea azotului în timpul compresiei şi respectiv decompresiei, pentru trei țesuturi diferite.

În cazul utilizării unor alte amestecuri respiratorii aşa cum sunt amestecurile NITROX, HELIOX, HIDROS, TRIMIS sau HIDRELION, în principiu, fenomenul de degajare a gazelor inerte este asemănător din punct de vedere calitativ cu fenomenul de degajare azotului din cazul utilizării aerului ca amestec respirator.

Tabelele de decompresie, elaborate tocmai având la bază fenomenele biofizice prezentate mai sus, reprezintă programe de decompresie, calculate astfel încât, în nici un moment şi în nici un ţesut, să nu fie depăşit raportul critic de suprasaturaţie.

2.1.4. ACCIDENTELE BIOFIZICE (ACCIDENTELE DE DECOMPRESIE)

Accidentele de decompresie sunt accidentele datorate efectelor biofizice ale presiunii şi sunt specifice atât scafandrilor autonomi cât şi scafandrilor alimentaţi de la suprafaţă, respirând fie aer comprimat fie un alt amestec respirator.

În timpul scufundării, în faza coborârii scafandrului către adâncimea de lucru, apare fenomenul de dizolvare a azotului sau a altor gaze inerte, utilizate la fabricarea amestecurilor respiratorii, în ţesuturi şi în lichidele interstiţiale. Dizolvarea azotului sau a altor gaze inerte utilizate în scufundare ca diluant al oxigenului, este cu atât mai importantă cu cât presiunea (adâncimea) este mai mare.

În faza de revenire la suprafaţă, scafandrul trebuie să respecte cu stricteţe programul de ridicare impus de tabelele de decompresie special calculate. Urmând programul de decompresie cerut de tabelul de decompresie potrivit, azotul sau alt gaz inert dizolvat în organism se va elimina din ţesuturi şi, prin intermediul sângelui va fi trimis către plămâni fiind apoi evacuat prin căile respiratorii. În acest caz, eliminarea azotului sau a altui gaz inert din ţesuturi, se face fără apariţia de bule periculoase, decompresia decurgând fără riscul apariţiei de accidente.

Atunci când însă, din diferite motive, scafandrul nu respectă palierele impuse de tabelul de decompresie şi urcă la suprafaţă prea repede, azotul sau alt gaz inert dizolvat se degajă dând naştere la bule de gaz, al cărui număr este cu atât mai important cu cât ridicarea este mai rapidă, bule ce pot conduce la apariţia accidentelor de decompresie. Accidentele de decompresie sunt cele mai frecvente accidente de scufundare şi se manifestă sub diferite forme cum ar fi: mâncărimi, epuizare, dureri articulare, paralizii şi chiar moarte.

2.1.4.1. Descrierea accidentelor de decompresie

Accidentele de decompresie survin în 50% din cazuri în cursul primelor 30 de minute de după ieşirea scafandrului din apă şi 95 % din accidente se declară în cursul primelor 3 ore de după ieşirea din apă.

Uneori, accidentul de decompresie poate să apară după un timp mai lung, de până la 24 de ore de la sfârşitul scufundării. Timpul de latenţă a apariţiei unui accident de decompresie este variabil de la un individ la altul.

Accidentele de decompresie pot fi acute sau cronice şi se manifestă mai ales sub formă de dureri localizate. Paraliziile sunt mult mai rare, iar accidentele pulmonare şi cardiace apar în mod excepţional.

Accidentele biofizice (accidentele de decompresie) pot fi împărţite în patru grupe după cum urmează (fig. 2.15):

- accidente cutanate;
- accidente osteo-artro-musculare (benduri);
- accidente neurologice;
- accidente cu manifestări ORL (vestibulare);
- tulburări respiratorii.

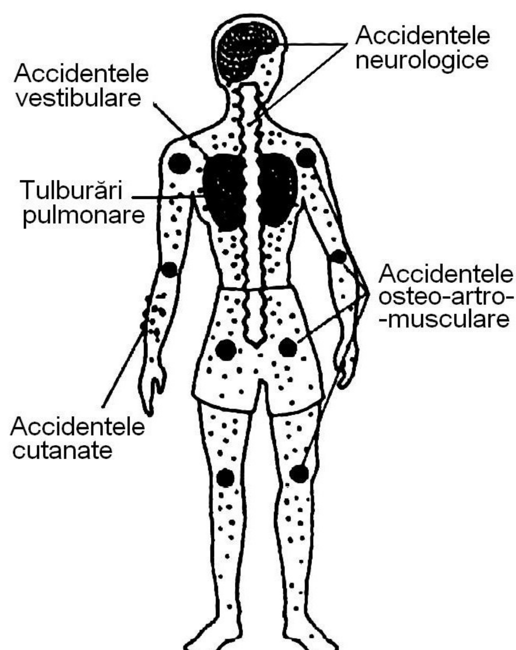


Fig. 2.15. Accidentele biofizice (de decompresie).

a) Accidente cutanate

Accidentele cutanate se manifestă prin simptome cutanate şi anume prin senzaţii de mâncărimi ale pielii şi diverse erupţii, localizate sau generalizate, legate de eliminarea bulelor de azot sau de alt gaz inert, prin piele. Acest tip de accidente, deşi întâlnit şi la scafandri, este specific muncitorilor chesonieri şi persoanelor care execută scufundări în mediu uscat (în chesoane sau în barocamere) la adâncimi mai mari de 60 m.

Senzaţiile de mâncărime au o intensitate variabilă, localizându-se în general la nivelul membrelor superioare, toracelui şi abdomenului.

b) Accidente osteo-artro-musculare (benduri)

Termenul de "bend" a fost introdus în anul 1894 de Smith pentru a defini artralgiile care dau o atitudine curbată muncitorilor submarini, care la aceea vreme erau în majoritate greci, de unde "grecian bends" sau simplu "bends".

Bendurile apar, în general, imediat după executarea unei decompresii necorespunzătoare şi se manifestă prin dureri localizate la nivelul uneia sau a mai multor articulaţii (genunchi, umăr, cot), sau inserţii musculare peri-articulare.

Bendurile se manifestă prin dureri progresive, pe măsură ce bulele localizate în ţesuturile peri-articulare se dezvoltă. Durerile cresc în intensitate până ce devin insuportabile.

Articulaţiile cele mai atinse sunt: umerii, coatele, încheieturile mâinilor, genunchii, şoldurile şi încheieturile labelor. Examenul radiologic este negativ. Durerile dispar imediat după recompresie şi tratament cu oxigen hiperbar. Refacerea este totală şi fără sechele.

Dacă bendul nu este tratat, există adesea posibilitatea ca durerile să dispară în câteva zile sau săptămâni. Pericolul unui bend netratat este legat de potenţialitatea evoluţiei sale spre o afecţiune cronică gravă, invalidantă. Astfel, bendurile uşoare netratate pot evolua spre osteoartrită sau osteonecroză, în timp ce formele mai grave pot genera paralizii şi chiar moartea. Continuarea scufundărilor după un bend netratat sau tratat necorespunzător poate recidiva accidental, putând antrena infirmităţi de lungă durată.

b) Accidente neurologice

Accidentele neurologice sunt dintre cele mai grave accidente de decompresie şi sunt legate de nerespectarea palierelor de decompresie.

Aceste accidente apar la un interval de timp relativ scurt după ieşirea scafandrului din apă. Simptomele caracteristice apar în primele minute după revenirea la presiunea atmosferică. Sindromul neurologic poate să se limiteze la o paraplegie sau la monoplegia unui membru inferior, dar adesea, poate fi atins unul din membrele superioare, sau amândouă, completându-se tabloul şi realizându-se o tetraplegie mai mult sau mai puţin completă şi simetrică.

Simptomele de recunoaştere a acestor accidente sunt:

– indispoziţie generală, oboseală intensă, nelinişte, impresia unei sincope iminente;
– dureri între omoplaţi sau în centură;
– furnicături în membrele inferioare;
– imposibilitatea de a se ţine în picioare;
– tulburări vezicale: imposibiliatea de a urina.

Tratamentul de urgenţă al accidentelor neurologice presupune recompresia şi decompresia terapeutică după tabele de decompresie terapeutice alese în funcţie de diagnosticul stabilit.

d) Accidente cu manifestări ORL (vestibulare)

Scafandrul care prezintă ameţeli mai mult sau mai puţin violente şi asociate cu stări de vomă şi surditate (nu întotdeauna), prezintă un accident vestibular calificat ca "rău de adâncime".

Când tulburările de echilibru persistă, scafandrul accidentat trebuie consultat de un medic specialist în medicina hiperbară. Când afecţiunea vestibulară este izolată, nu va putea fi vorba de un barotraumatism al urechii deoarece o leziune datorată presiunii antrenează o afecţiune cohleară, dată fiind continuitatea lichidelor labirintice.

Ineficacitatea recompresiei şi eficacitatea tratamentului cu vasodilatatoare dă impresia că bulele de gaz nu au un rol primordial. Acţiunea frigului asupra circulaţiei arteriolare din urechea internă va antrena o tulburare a desaturării şi formării de bule locale. Practic, ameţelile calificate ca "rău de adâncime" după o scufundare în apă rece, asociate cu un nistagmus (mişcare pendulară a globului ocular) intens, trebuie să conducă la suspectarea unei afecţiuni labirintice şi la executarea unui tratament cu vasodilatatoare, altfel existând riscul unor sechele definitive.

e) Tulburări respiratorii

Accidentele pulmonare datorate unei decompresii defectuoase se manifestă sub formă de dispnee (dificultate respiratorie) şi tuse seacă, acompaniate de o cianoză (învineţire) a extremităţilor şi a buzelor. Este vorba în acest caz, de tulburări survenite prin degajarea de bule în capilarele ţesutului pulmonar. Degajarea gazului sub formă de bule crează o blocpnee şi apariţia de reflexe inhibitorii ale respiraţiei. Scafandrul, victimă a unui accident pulmonar de decompresie, pare atins de un edem pulmonar acut sau de un infarct pulmonar. El este în stare de şoc, iar situaţia lui critică impune un tratament sever şi cât mai rapid.

Trebuie diferențiat în mod net accidentul pulmonar de decompresie de accidentul mecanic numit „suprapresiune pulmonară". Astfel, în cazul în care criza respiratorie este însoțită de scuipare de sânge, de pierderea cunoştinței şi de o paralizie generalizată, atunci nu avem de-a face cu un accident de decompresie, ci cu o "suprapresiune pulmonară".

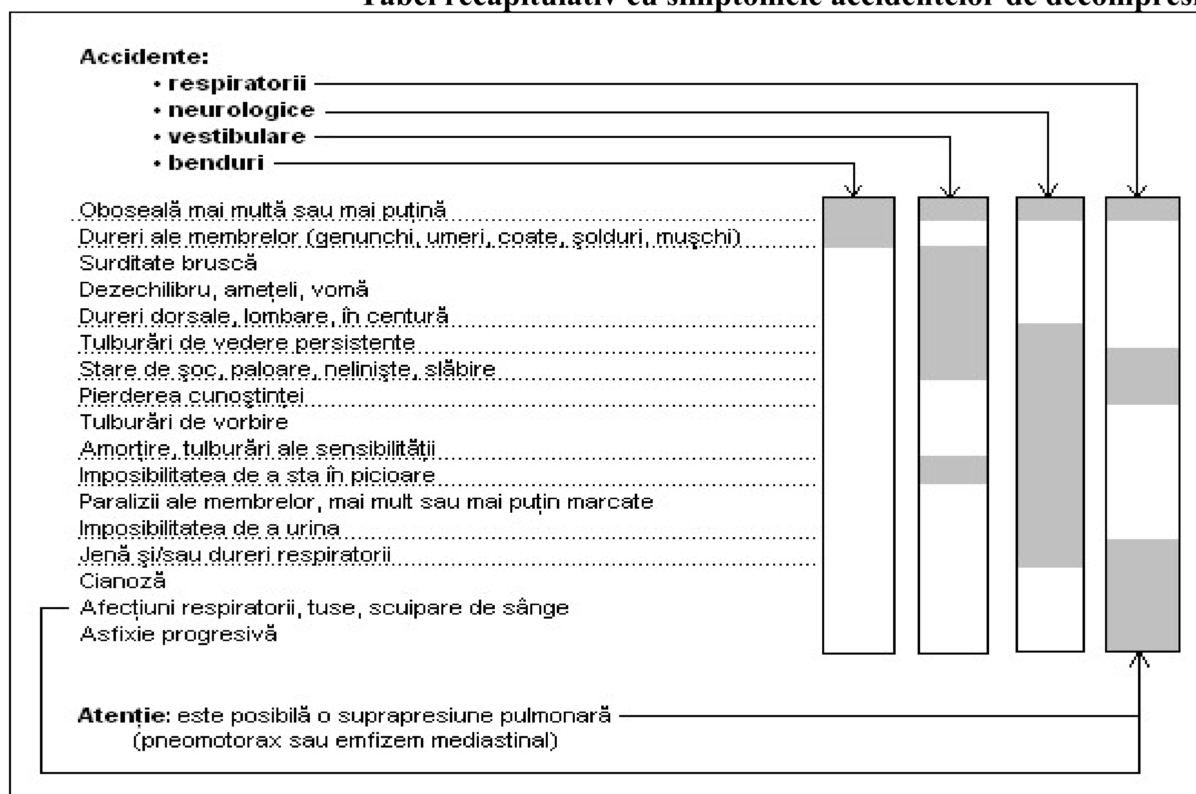
Toate accidentele de decompresie descrise în acest paragraf au întotdeauna un caracter de urgență şi trebuie tratate în unități medicale specializate, sub supravegherea unor medici specialişti în medicina hiperbară.

O astfel de unitate specializată este Laboratorul Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri Constanța.

În tabelul 2.2 sunt recapitulate accidentele de decompresie (benduri, vestibulare, neurologice, respiratorii), cu simptomele specifice.

Tabelul 2.2

Tabel recapitulativ cu simptomele accidentelor de decompresie



2.1.4.2. Prevenirea, profilaxia şi tratamentul accidentelor de decompresie

Scafandrul pătrunde într-un mediu ostil, echipat cu un aparat care nu are întotdeauna o funcționare perfectă şi, în cazul unei pregătiri insuficiente, a unei adaptări la efort necorespunzătoare, necunoaşterii zonei de scufundare, cunoaşterii insuficiente a relației om-mediu subacvatic, precum şi în cazul defectării accidentale a unei componente a aparatului de respirat sau a exploatării necorespunzătoare a acestuia, poate să apară necesitatea sau chiar obligativitatea unei reveniri la suprafață fără a ține cont de programul de ridicare impus de tabelele de decompresie. În afară de aceste situații de forță majoră, care obligă scafandrul la o ieşire în dificultate, nerespectarea regulilor de decompresie la urcarea către suprafață, se mai poate datora şi ignoranței

scafandrului ca urmare a slabei pregătiri teoretice şi practice, necunoaşterii profunde a problemelor de fizica şi fiziologia scufundării, precum şi neînsuşirii corespunzătoare a modului de utilizare corectă a tabelelor de decompresie.

Indiferent de cauza revenirii necontrolate la suprafaţă, fără respectarea tabelelor de decompresie, aceasta poate conduce la accidente de decompresie care trebuie tratate corespunzător.

Trebuie menţionat şi faptul că în cazuri excepţionale, întâlnite extrem de rar, pot apărea accidente de decompresie chiar şi atunci când scafandrul respectă întocmai programul impus de tabelele de decompresie. Aceste accidente excepţionale pot să apară datorită unor particularităţi ieşite din comun ale organismului unor scafandri, precum şi datoritş unor caracteristici fizice deosebite ale mediului subacvatic în care se desfăşoară scufundarea.

Un bun scafandru trebuie să analizeze în detaliu viitoarea sa intervenţie sub apă, atât ca activitate cât mai ales din punct de vedere al planificării fazelor de scufundare, funcţie de timpul avut la dispoziţie. De asemenea, scafandrul trebuie să cunoască modul de prevenire a unui accident de decompresie, primele măsuri profilactice ce trebuie luate în cazul unei ieşiri în dificultate, chiar dacă nu sunt semne că accidentul s-a produs, sau să se lase recomprimat, în cazul apariţiei unui accident de decompresie, pentru a fi supus unui tratament adecvat.

Prin urmare, scafandrii trebuie să cunoască atât metodele de prevenire cât şi posibilităţile de profilaxie şi tratament aferente diferitelor accidente de decompresie**.**

Iată de ce, scafandrii vor trebui să considere accidentul de decompresie ca o "boală" care este posibil să apară la orice scufundare şi să fie pregătiţi pentru a o preveni sau pentru a o trata corespunzător, ceea ce înseamnă:

– cunoaşterea regulilor de evitare a accidentelor de decompresie (*prevenire*);
– cunoaşterea posibilităţilor de evitare a apariţiei accidentelor de decompresie în cazul unei ieşiri în dificultate (*profilaxie*);
– cunoaşterea posibilităţilor de tratare a unui accident de decompresie declanşat (*tratament*).

a) Prevenirea accidentelor de decompresie

Bineînţeles că regula fundamentală necesară prevenirii apariţiei accidentelor de decompresie o reprezintă alegerea corespunzătoare a programului de decompresie şi respectarea cu rigurozitate a palierelor impuse de tabelul de decompresie în timpul ridicării la suprafaţă.

În cele ce urmează se vor prezenta şi alte câteva recomandări utile pentru reducerea la minimum a posibilităţilor de apariţie a unor eventuale accidente de decompresie, recomandări ce se doresc aplicate în mod suplimentar, pe lângă aplicarea riguroasă a tabelului de decompresie:

– respectarea principiilor de igienă şi dietă recomandate de practica scufundării;

– analiza atentă şi în detaliu a activităţii ce urmează a fi efectuată sub apă. Trebuie reflectat asupra particularităţilor misiunii, asupra evenimentelor mai mult sau mai puţin previzibile care pot să apară în timpul scufundării, precum şi asupra diferitelor aspecte privind tehnologia de scufundare;

– executarea unui repaus de 3 minute înainte de începerea decompresiei (ridicării către suprafaţă), însoţită de efectuarea câtorva respiraţii forţate (hiperpnee). Este dovedit faptul că o consecinţă importantă a efortului muscular o reprezintă favorizarea formării bulelor de azot în ţesuturi;

– folosirea acelor tabele de decompresie care dau scafandrilor cea mai mare încredere;

– funcție de posibilități, se va căuta prelungirea timpului de staționare la palierul de 6 m şi/sau 3 m cu 5 minute;

– atunci când scafandrul aflat în imersie simte apariția oboselii sau un început de "gâfâială", va opri imediat lucrul şi îşi va regla ritmul respirator;

– pentru scufundări care nu necesită paliere de decompresie (scufundări sub curba de securitate), se recomandă totuşi executarea unui palier de 3 până la 5 minute la adâncimea de 3 m;

– după revenirea la suprafața apei (la presiunea atmosferică), se va evita orice efort fizic.

Prin respectarea tabelelor de decompresie şi prin aplicarea recomandărilor de mai sus, riscul de apariție a unui accident de decompresie este redus la minimum.

b) Profilaxia accidentelor de decompresie

Profilaxia se referă la situațiile în care, din diferite motive, scafandrul a revenit la suprafață (la presiunea atmosferică) după efectuarea unei decompresii mai rapide decât cea impusă de tabelul de decompresie. Astfel, profilaxia se referă la cazurile de ieşire a scafandrului în dificultate, la care revenirea la suprafață s-a realizat fie foarte rapid, cu o viteză de urcare superioară vitezei indicate, fie după o decompresie excesiv de rapidă, fie după o decompresie cu paliere scurtate.

În astfel de situații, se vor aplica nişte programe profilactice specifice situației respective, fără a mai aştepta apariția simptomelor caracteristice accidentelor de decompresie.



Fig. 2.16. Interiorul unei barocamere multiloc pentru profilaxia şi tratamentul accidentelor de decompresie.

Programele profilactice, care pot fi aplicate fie în apă printr-o reimersare imediată, fie în barocamere monoloc sau multiloc (fig. 2.16) printr-o recompresie imediată, trebuie începute cât mai repede posibil, în maximum 3 minute de la revenirea scafandrului la suprafață (la presiunea atmosferică).

Programele profilactice constau în reimersarea scafandrului în apă la o anumită adâncime sau în recomprimarea lui în barocameră la o presiune corespunzătoare adâncimii de reimersare, urmată de un program de decompresie specializat conform unor tabele profilactice.

Aceste programe trebuie cunoscute de scafandrii profesionişti, de membrii echipei de asigurare a scufundărilor de la suprafaţă şi de operatorii de barocameră. În această carte vor fi prezentate doar situaţiile care impun profilaxie, fără a fi prezentate şi tabelele profilactice aferente. Pentru cei doritori să cunoască şi tabelele profilactice, acestea pot fi găsite în "Ghidul scafandrului autonom", apărut la Editura Olimp-Press în 1992 şi având ca autori pe Aron Petru, Mircea Degeratu şi Sergiu Ioniţă.

În ceea ce priveşte programele de profilaxie în vederea evitării apariţiei unor accidente de decompresie, se disting mai multe situaţii (toate aceste situaţii se referă la scufundări cu aer, iar tabelele profilactice sunt de asemenea cu respirare de aer), după cum urmează:

• *Adâncimea de scufundare şi durata scufundării nu necesită paliere de decompresie (scufundare sub curba de securitate). Revenirea la suprafaţă (presiunea atmosferică) s-a realizat foarte rapid.*

În această situaţie scafandrul trebuie reimersat în apă sau recomprimat în barocameră la 30 m adâncime, după care se va executa o revenire la suprafaţă (la presiunea atmosferică) în 32 de minute conform unui tabel profilactic specializat. După o astfel de decompresie, scafandrul nu mai are drept de scufundare cel puţin 12 ore.

• *Adâncimea de scufundare şi durata scufundării au necesitat revenirea la suprafaţă (la presiunea atmosferică) cu paliere de decompresie. Adâncimea de scufundare nu a fost mai mare de 24 m. S-a executat o decompresie excesiv de rapidă.*

În această situaţie, scafandrul trebuie reimersat în apă sau recomprimat în barocameră la 12 m adâncime, după care se va executa o revenire la suprafaţă (la presiunea atmosferică) conform unui tabel profilactic specializat acestei situaţii. După executarea acestei decompresii, scafandrul trebuie observat în continuare şi i se recomandă să nu mai execute o altă scufundare cel puţin 12 ore.

• *Adâncimea de scufundare şi durata scufundării au necesitat revenirea la suprafaţă cu paliere de decompresie. Adâncimea de scufundare a fost cuprinsă între 25 m şi 42 m. S-a executat o decompresie excesiv de rapidă.*

În această situaţie, scafandrul trebuie reimersat în apă sau recomprimat în barocameră la 24 m adâncime, după care se va executa o revenire la suprafaţă (la presiunea atmosferică) conform unui tabel profilactic specializat. După executarea acestei decompresii scafandrul trebuie observat în continuare şi i se recomandă să nu mai execute o altă scufundare cel puţin 24 ore.

• *Adâncimea de scufundare şi durata scufundării au necesitat revenirea la suprafaţă cu paliere de decompresie. Adâncimea de scufundare a fost cuprinsă între 43 m şi 60 m. S-a executat o decompresie excesiv de rapidă.*

În această situaţie, scafandrul trebuie reimersat în apă sau recomprimat în barocameră la 30 m adâncime, după care se va executa o revenire la suprafaţă (la presiunea atmosferică) conform unui tabel profilactic specializat.

• *Adâncimea de scufundare şi durata scufundării au necesitat revenirea la suprafaţă cu paliere de decompresie. Decompresia s-a executat cu paliere scurtate fie din lipsă de aer, fie din motive tehnice.*

În această situaţie, se disting două cazuri posibile:

– revenire bruscă la suprafaţă, de la un palier mai mic de 6 m.

În acest caz, scafandrul va fi reimersat în apă sau recomprimat în barocameră la 12 m adâncime, după care se va executa o decompresie conform unui tabel profilactic specializat.

– revenire bruscă la suprafaţă, de la palierul de 6 m sau 3 m.

În această situaţie, scafandrul va fi reimersat în apă sau recomprimat într-o barocameră la 9 m adâncime. Se staţionează 10 minute şi apoi se revine la presiunea atmosferică cu următoarele paliere: la 6 m pe durata palierului ce trebuia efectuat multiplicată cu 1,5, sau minimum 10 minute pentru scufundarea ce nu necesită palier la 6 m, apoi la 3 m pe durata palierului ce trebuia efectuat multiplicată cu 1,5.

Atenţie ! Programele profilactice vor fi organizate şi urmărite numai de către specialişti în domeniul scufundării profesionale. Deoarece programele profilactice trebuie aplicate imediat după ieşirea din apă, personalul de asistare a scufundării trebuie să pregătească din timp echipamentele şi instalaţiile necesare.

c) Tratamentul accidentelor de decompresie

Tratamentul accidentelor de decompresie se referă la situaţiile în care accidentele de decompresie s-au declanşat, iar scafandrul începe să resimtă simptomele caracteristice acestora.

Accidentele de decompresie sunt riscuri la care sunt expuşi toţi scafandrii. Din acest motiv, societăţile de scufundare trebuie să se preocupe de echiparea cu mijloace tehnice specializate şi de stabilirea unor programe specifice, necesare pentru intervenţiile în caz de accident, ştiut fiind că eficacitatea măsurilor care se iau atunci când apare un accident este direct proporţională cu rapiditatea punerii lor în aplicare. Accidentele de decompresie se pot produce atât după o decompresie scurtată cât şi, mai rar, după o decompresie normală.

Tratamentul accidentelor de decompresie este în primul rând un tratament efectuat în barocameră. De aceea, dacă activitatea de scufundare se desfăşoară la adâncimi mai mari de 12 m, se recomandă prezenţa, în imediata apropiere a unei barocamere monoloc sau multiloc pregătită pentru o eventuală presurizare.

Pentru tratarea corespunzătoare a unui accident de decompresie este necesară stabilirea cât mai rapidă a tipului de accident precum şi a condiţiilor în care s-a produs. Astfel, se poate stabili cu o bună precizie tipul de accident din tabelul 2.2, funcţie de simptomele resimţite de scafandru (tipul B – benduri, tipul V – vestibulare, tipul N – neurologice). După aceea, se încadrează accidentul în una din cele două categorii privind condiţiile în care s-a produs (după o decompresie scurtată sau după o decompresie normală). În acest fel, se va încadra accidentul în una din cele 6 situaţii de tratare rezultate:

• Accidente de decompresie apărute *după o decompresie scurtată:*
  – accidente tip B (benduri);
  – accidente tip V (vestibulare);

– accidente tip N (neurologice);
• Accidente de decompresie apărute *după o decompresie normală*:
– accidente tip B (benduri);
– accidente tip V (vestibulare);
– accidente tip N (neurologice).

Pentru fiecare din cele 6 situații de tratare a accidentelor de decompresie, există scheme şi tabele de tratament specifice.

Schemele şi tabelele de tratament trebuie cunoscute doar de specialiştii care se ocupă cu tratarea accidentelor de decompresie. Schemele şi tabelele de tratament pentru accidentele de decompresie pot fi găsite în "Ghidul scafandrului autonom" apărut la Editura Olimp-Press, în 1992 şi având ca autori pe Aron Petru, Mircea Degeratu şi Sergiu Ioniță.

2.1.5. EFECTELE BIOCHIMICE ALE PRESIUNII

Variațiile de presiune ce apar în timpul scufundării conduc la modificări ale presiunii totale a amestecului gazos alveolar şi deci la modificări ale presiunilor parțiale ale gazelor componente din amestecul gazos aflat în alveolele plămânilor. Din acest motiv, după un anumit interval de timp vor apărea şi variații similare ale tensiunilor aceloraşi gaze dizolvate în organism.

Fiecare gaz component al amestecului respirator are un anumit efect asupra organismului, acesta reacționând la variațiile presiunilor parțiale ale gazelor componente după cum urmează:

• Hemoglobina se încarcă cu oxigen funcție de presiunea parțială a oxigenului din aerul sau din amestecul gazos respirat. Astfel, dacă se respiră un amestec gazos la o presiune la care presiunea parțială a oxigenului din amestec este mai mică de 0,17 bar (sc. abs.), hemoglobina se încarcă insuficient cu oxigen conducând la apariția fenomenului de *hipoxie*. Din contră, hemoglobina este practic saturată dacă presiunea parțială a oxigenului este de 0,21 bar (sc. abs.), aşa cum se întâmplă la respirarea de aer la presiunea atmosferică. La un scafandru care respiră aer la adâncimea de 40 m, presiunea parțială a oxigenului este de $0{,}21 \cdot 5 = 1{,}05$ bar (sc. abs.), deci mai mare decât valoarea normooxică de 0,21 bar (sc. abs.). În acest caz, avem de-a face cu un fenomen de *hiperoxie.* Hiperoxia, ce corespunde unei presiuni parțiale a oxigenului mai mari decât valoarea critică de 1,7 bar (sc. abs.) poate conduce la apariția aşa numitei *crize hiperoxice.*

• Centrii respiratori reglează respirația pe baza informațiilor care-i sosesc de la organism. Informația principală este tensiunea dioxidului de carbon şi a oxigenului dizolvate în sânge.

În paragraful următor, aferent accidentelor biochimice de scufundare, se poate vedea importanța valorilor presiunilor parțiale ale gazelor ce compun amestecul gazos respirat de către scafandru în funcționarea între limite normale a organismului uman aflat în condiții de hiperbarism.

2.1.6. ACCIDENTELE BIOCHIMICE (ACCIDENTELE TOXICE)

Accidentele biochimice sunt accidente datorate efectelor biochimice ale presiunii şi se referă la acţiunea diferitelor gaze asupra organismului scafandrului. Efectele acţiunii acestor gaze sunt funcţie de presiunea parţială a fiecărui gaz din amestecul respirator, deci şi de presiunea totală (de adâncimea de scufundare) şi uneori sunt funcţie şi de timpul de expunere la presiunea respectivă.

Pentru scafandrul respirând aer sau alt amestec respirator, interesează accidentele datorate efectelor biochimice ale gazelor zise "inerte" (narcoza), ale oxigenului (criza hiperoxică şi hipoxia) şi ale dioxidului de carbon (hipercapnia) (fig. 2.17).

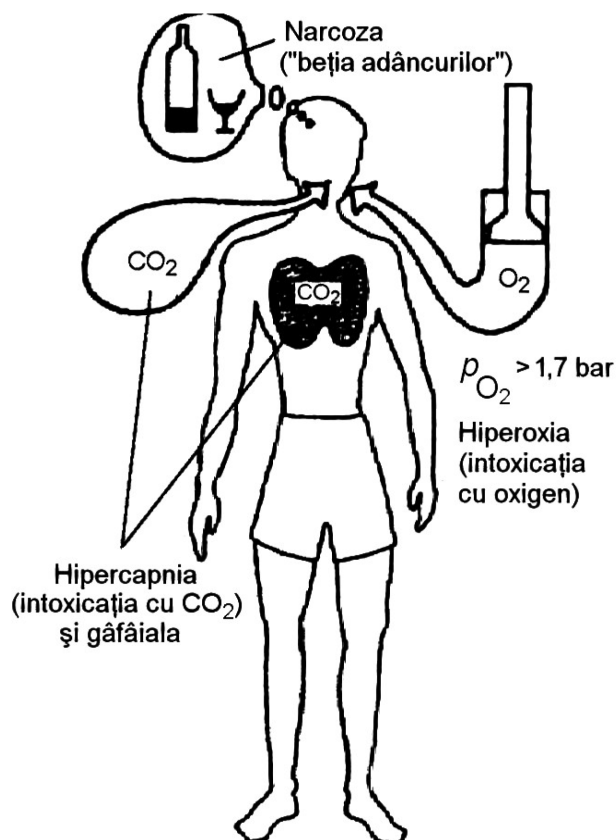


Fig. 2.17. Accidentele biochimice (toxice).

2.1.6.1. Narcoza gazelor inerte

Narcoza reprezintă un ansamblu de perturbaţii de comportament, memorie, putere de concentrare şi coordonare neuro-musculară. Starea euforică, care constituie primul semn de narcoză, determină la scafandri o tendinţă de supraevaluare a propriei persoane şi evoluează spre ineficacitate în acţiune şi pierderea cunoştinţei. Efectele narcotice sunt amplificate de presiunea hidrostatică. În acest sens, sunt de remarcat studiile lui Behnke şi mai târziu ale lui Edmonds asupra efectelor narcotice ale azotului. De asemenea, intensitatea narcozei este funcţie de natura gazului inert. Brauer, în studiile sale, face o clasificare a gazelor inerte, în ordine crescătoare a puterii lor narcotice specifice, raportată la puterea narcotică a azotului: heliu (0,07), hidrogen (0,26), azot (1), argon (1,7), kripton (10). El corectează puterea narcotică de proprietăţile fizice ale gazelor, în special de masa molară şi de coeficeintul de solubilitate în lipide a acestora.

Narcoza azotului, poate apărea, la scafandrul care respiră aer, încă de la adâncimea de 30 m şi, în mod practic, toţi indivizii sunt atinşi de narcoză la adâncimea de 70 ... 80 m.

Efectele azotului asupra organismului nu sunt suficient de elucidate de către specialişti. Aceştia consideră că narcoza azotului este probabil similară cu efectele gazelor folosite la anestezie. Azotul poate avea un efect asemănător cu cel al oxidului de azot (gazului ilariant), dar ceva mai slab.

Tulburările pe care le produce azotul respirator la presiuni parțiale crescute, timp îndelungat dovedesc faptul că azotul nu mai rămâne inert în aceste condiții, ci intră în diverse reacții fizico-chmice.

Heliul prezintă efecte narcotice mau puțin severe decât azotul.

Hidrogenul este mai solubil în pilide şi deci induce narcoze mai intens decât heliul.

Neonul este şi el un gaz luat în considerație datorită puterii nercotice mai scăzute, însă experimentările privind utilizarea lui în scufundare au fost relativ puțin.

În continuare se prezintă simptomele narcozei azotului precum şi modul de prevenire şi tratare a narcozei azotului, în cazul în care scafandrul respirc aer sau amestecuri binare azot-oxigen (NITROX).

a) Simptomele narcozei azotului

Pentru scafandrul respirând aer, la adâncimea de 30 m, narcoza azotului îşi face deja simțită prezența afectând capacitatea de gândire şi de luare a deciziilor. La adâncimea de 50 m, narcoza azotului se manifestă şi prin apariția amețelii. Peste adâncimea de 58 m narcoza azotului se poate manifesta prin vertije, stare de euforie uneori însoțită de o impresie falsă de mărire a forței musculare, de pierderea din ce în ce mai accentuată a instinctului de conservare, urmată în cazuri grave de pierderea cunoştinței, scafandrul fiind expus celor mai grave pericole.

Pentru evitarea narcozei azotului, cercetările limitează superior presiunea parțială a azotului la p_{N_2} =5,3 bar (sc. abs.) ceea ce corespunde unei adâncimi limită de 58 m. Această limită se referă însă la adâncimea de la care pot apărea efectele mai grave ale narcozei azotului.

Ținând cont de faptul că primele simptome ale narcozei, ceva mai slabe, apar chiar după adâncimi de 30 m, se recomandă scafandrilor autonomi, mai ales celor începători să nu depăşească adâncimea de 40 m, prin aceasta evitând apariția unor efecte grave ale narcozei azotului cu consecințe ce pot fi fatale.

b) Prevenirea şi tratarea narcozei azotului

Singura metodă de prevenire a narcozei azotului la scafandrul cu aer este aceea de a limita scufundarea la o adâncime la care presiunea parțială a azotului este mai mică decât valoarea limită. Astfel, scafandrii antrenați pot efectua scufundări până la maximum 58 m adâncime, în timp de scafandrii începători sau cu predispoziție mai ridicată la narcoză trebuie să-şi limiteze scufundările la 40 m adâncime.

Predispoziția la narcoza cu azot variază de la individ la individ, dar nimeni nu este imun. Există mai mulți factori care pot micşora rezistența la narcoza azotului, dintre aceştia fiind consumul de alcool, oboseala, excesul de dioxid de carbon acumulat în plămâni datorită unei respirații superficiale, lipsa de experiență şi nervozitatea. Oricare ar fi simptomele, ridicarea la o adâncime mai mică este metoda cea mai eficientă în tratarea narcozei cu azot. Urcarea către o adâncime mai mică va conduce la o diminuare a simptomelor sau chiar la dispariția totală a lor.

2.1.6.2. Criza hiperoxică (intoxicația cu oxigen)

Oxigenul respirat la o presiune parțială ridicată are un efect toxic asupra organismului. Toxicitatea oxigenului se manifestă la nivelul sistemului nervos central. Domeniul de presiuni parțiale ale oxigenului cuprins între 0,21 bar (sc. abs.) şi 0,42 bar (sc. abs.) se consideră ca un domeniu normooxic. Se consideră hiperoxic un amestec la care presiunea parțială a oxigenului din amestec este mai mare de 0,42 bar (sc. abs.).

Hiperoxia poate fi cronică sau acută. *Hiperoxia cronică* se întâlneşte atunci când presiunea parțială a oxigenului din amestecul respirator este cuprinsă între 0,42 bar (sc. abs.) şi 1,7 bar (sc. abs.). *Hiperoxia acută* care se manifestă printr-o criză hiperoxică, poate să apară atunci când presiunea parțială a oxigenului din amestecul respirator este mai mare de 1,7 bar (sc. abs.). Dacă hiperoxia cronică este bine tolerată de către scafandri în cursul unor scufundări de scurtă durată, hiperoxia acută (criza hiperoxică) trebuie evitată deoarece poate avea consecințe grave.

Criza hiperoxică are manifestări asemănătoare crizei epileptice şi anume convulsii violente şi pierderea cunoştinței. Momentul declanşării crizei hiperoxice este variabil de la individ la individ şi depinde atât de presiunea parțială a oxigenului cât şi de timpul de expunere la presiunea respectivă.

Pentru preîntâmpinarea apariției crizei hiperoxice, scufundarea cu aer comprimat trebuie limitată la adâncimea de 70 m, adâncime la care presiunea parțială a oxigenului din aerul respirat este $p_{O_2} = 1{,}7$ bar (sc. abs.).

După cum se poate observa, la scafandrii autonomi respirând aer, nu poate apărea criza hiperoxică deoarece scufundarea cu aer este limitată la adâncimea de 58 m din condiția de evitare a narcozei cu azot.

Criza hiperoxică poate apărea la scafandri militari care respiră oxigen pur şi la scafandri profesionişti care respiră amestecuri supraoxigenate.

2.1.6.3. Hipercapnia şi hipoxia

Hipercapnia sau excesul de dioxid de carbon în sânge, caracterizează un ansamblu de efecte fiziopatologice datorate creşterii presiunii parțiale a dioxidului de carbon în amestecul respirator. Hipercapnia poate fi cronică dacă presiunea parțială a dioxidului de carbon p_{CO^2} este peste valoarea normală, dar sub 0,015 bar (sc. abs.) şi acută atunci când p_{CO^2} depăşeşte 0,015 bar (sc. abs.). *Hipercapnia cronică*, care apare destul de des la scafandrii autonomi respirând aer, reprezintă mai degrabă o adaptare a organismului la condițiile respirării unui amestec gazos cu o participație ridicată de dioxid de carbon, în timp ce *hipercapnia acută* reprezintă un accident grav, acesta acționând asupra respirației, circulației şi sistemului nervos.

În cazul scafandrului autonom, orice modificări care apar în procesul respirației normale pot conduce la o creştere a nivelului de dioxid de carbon din amestecul gazos din plămâni şi implicit din sânge. Creşterea nivelului de dioxid de carbon cu efectele specifice hipercapniei, este resimțită mai ales atunci când scafandrul înoată sau când desfăşoară o activitate intensă sub apă. În aceste situații poate apărea senzația de "lipsă de aer" care vine de la centrul respirator ce răspunde la creşterea nivelului de dioxid de carbon. Aceasta poate conduce la scurtarea respirației, la accelerarea ritmului respirator (gâfâială) şi la oboseală. Aceste efecte ale hipercapniei pot duce la apariția panicii cu consecințe foarte grave. De aceea, atunci când scafandrul simte un anumit inconfort respirator, nevoia inhalării unei cantități mai mari de aer şi oboseală, el trebuie să

procedeze la oprirea înotului sau a activității pe care o desfăşoară, relaxându-se şi respirând profund.

Mulți din factorii care împiedică sau încetinesc schimbul normal de gaze la nivelul plămânilor (respirația superficială, respirația cu pauze, utilizarea unui aparat de respirat cu rezistențe gazodinamice mari etc.) conduc nu numai la o creştere a nivelului de dioxid de carbon, ci şi la o scădere a nivelului de oxigen din amestecul gazos din plămâni şi implicit din sânge şi celule.

Scăderea nivelului de oxigen din amestecul respirator poartă numele de *hipoxie*. Se spune despre un amestec respirator că este hipoxic dacă presiunea parțială a oxigenului din acest amestec, p_{O_2}, este mai mică de 0,17 bar (sc. abs.). Simptomele hipoxiei provin fie de la un echipament defect sau prost reglat, fie de la o respirație incorectă.

Atât excesul de dioxid de carbon cât şi hipoxia pot cauza o respirație grea, dureri de cap şi chiar pierderea cunoştinței. De asemenea, hipoxia poate cauza şi senzația de greață, iar excesul de dioxid de carbon poate conduce la crampe musculare şi oboseală. Pentru limitarea efectelor hipercapniei şi hipoxiei, scafandrul trebuie să efectueze o manevră respiratorie constând dintr-o serie de inspirații profunde şi expirații forțate în scopul ventilării cât mai bune a plămânilor. Această manevră poartă numele de hiperventilație controlată.

Trebuie menționat faptul că hipoxia, ca şi anoxia (lipsa de oxigen), deşi corelată uneori cu hipercapnia, nu face parte din categoria accidentelor toxice propriu-zise şi de aceea poate fi încadrată în mod riguros în categoria altor accidente de scufundare, alături de hipotermie şi înec (fig. 2.18).

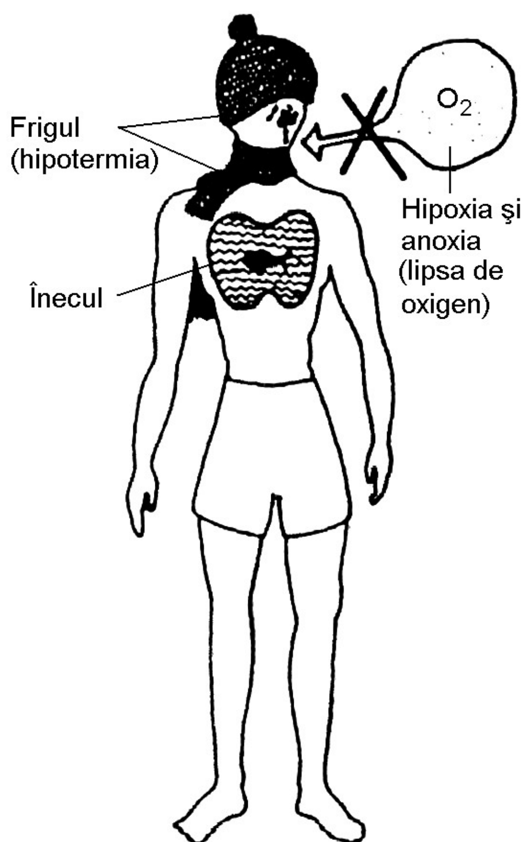


Fig. 2.18. Alte accidente de scufundare.

În cele ce urmează se prezintă, în mod sintetic, sub formă de tabele tipurile de accidente ale scufundării (tab. 2.3), precum şi cauzele, simptomele, măsurile ce trebuie luate şi acțiunile de prevenire pentru accidentele fizico-mecanice (tab. 2.4), biofizice (tab. 2.5) şi biochimice (tab. 2.6).

Tabelul 2.3

Tipuri de accidente de scufundări

Grupul de accidente	Tipul accidentului
Accidente fizico-mecanice (barotraumatisme)	• La coborâre: - placajul vizorului - barotraumatismele sinusurilor - barotraumatismele urechii medii - barotraumatismele dinților • La urcare: - barotraumatismele sinusurilor - barotraumatismele urechii medii - barotraumatisme ledinților - colicile scafandrilor - suprapresiunea pulmonară
Accidente biofizice (accidente de decompresie)	• Accidente cutanate • Accidente osteo-artro-musculare (benduri) • Accidente neurologice • Accidente cu manifestări ORL (vestibulare) • Tulburări respiratorii
Accidente biochimice (accidente toxice)	• Azot: - Narcoza azotului (beția adîncurilor) • Oxigen: - Hiperoxia (efectele Lorrain Smith şi Paul Bert) - Hipoxia şi anoxia (lipsa de oxigen) • Bioxid de carbon: - Hipercapnia
Alte accidente de scufundare	• Hipotermia • Înecul

Tabelul 2.4

Accidente fizico-mecanice (barotraumatisme)

Tipul accidentului		Cauze (**C**), Simptome (**S**), Măsuri (**M**), Prevenire (**P**)
Placajul vizorului	C	- Creşterea presiunii la coborâre - Geamul vizorului atinge nasul; interiorul vizorului este în depresiune; efect de ventuză - Leziuni oculare şi nazale
	S	• *În apă*: - tulburări de vedere; durere; hemoragie oculară sau nazală • *La revenirea din apă*: - ochi roşu; tulburări de vedere; curgeri de sânge din nas
	M	- Atunci când curge sânge din nas, se suflă nasul, iar apoi se comprimă nările cu capul aplecat înainte, sprijinit pe stern - Trebuie consultat un medic generalist, ORL sau oftalmolog
	P	- **Se va sufla, prin nas, aer în vizor, pe tot timpul coborârii**

Tabelul 2.4 (continuare)

Tipul accidentului		Cauze (**C**), Simptome (**S**), Măsuri (**M**), Prevenire (**P**)
Barotraumatismele sinusurilor	**C** **S** **M** **P**	Orificiu înfundat : • *La coborâre* : Sinusul în depresiune, efect de ventuză asupra mucoasei • *La urcare* : Aerul nu poate ieşi din sinus şi apasă pe perete (mai rar) - Dureri violente; curgeri de sânge din nas - Senzaţie de dureri dentare (sinus maxilar), lăcrimare - Se va consulta un medic ORL **- Nu se va forţa niciodată** • *La coborâre* Dacă apar dureri, se va urca un pic, se va scoate masca, se suflă nasul şi se încearcă din nou • *La urcare* : Se va coborâ din nou cu mai mulşi metri şi se va urca foarte lent
Barotraumatismele urechii medii	**C** **S** **M** **P**	• *La coborâre* : Dacă trompa lui Eustache este înfundată : - Apariţia unei diferenţe între presiunea internă (–) cea externă (+) şi a unei deformaţii a timpanului →spargerea timpanului. • *La urcare* : Dacă trompa lui Eustache este înfundată : - Invers ca la coborâre: Interior (+) exterior (–) • *La adâncimea de lucru* : Dacă conductul auditiv extern este înfundat (ex. cu un dop introdus în conductul auditiv şi se produce deschiderea trompei lui Eustache (prin deglutiţie): - Creştere bruscă de presiune → explozia timpanului - Durere uşoară, apoi din ce în ce mai violentă - Trosnete în ureche senzaţie de frig; Ameţeală; Sincopă • *La suprafaţă* : Dacă se efectuează manevra Valsalva apare un şuierat al aerului expirat prin ureche; dacă se introduce o ţigaretă în conductul auditiv extern, aceasta se înroşeşte - Trebuie consultat un medic ORL **- Trebuie asigurată o bună echilibrare fără a forţa** **- Se preferă manevrele Frenzel sau DTV (Deschidere Tubară Voluntară) manevrei Valsalva** **- Este interzisă utilizarea dopurilor de vată** • *La coborâre* : - Trebuie echilibrat înainte de apariţia celei mai mici dureri; după aceea va fi imposibil sau foarte greu - La nevoie, se va urca puţin cu capul în sus - În cazul unor dificultăţi frecvente, se va coborâ lent, cu capul în sus, picioarele fiind primele; Manevre posibile, în ordinea preferinţei: DTV, Frenzel, Valsalva. În cazul imposibilităţii echilibrării, se va urca la suprafaţă

Tabelul 2.4 (continuare)

Tipul accidentului		Cauze (**C**), Simptome (**S**), Măsuri (**M**), Prevenire (**P**)
		• *La urcare* : La cea mai mică durere, se va coborâ câțiva metri şi apoi se va urca lent. Manevra posibilă: Toynbee; niciodată Valsalva • *Înainte de scufundare* : Nu se vor introduce dopuri în conductul auditiv (vată etc.) La nevoie se va găuri cagula
Barotraumatismele dinților	**C**	• *La coborâre* : - Cavitatea aflată în depresiune, la fel ca la vizor şi sinus (foarte rar) - Zdrobirea pulpei • *La urcare* : - Aerul din cavitate se dilată deoarece nu poate fi evacuat - Presiunea puternică exercitată asupra peretelui intern poate provoca explozia dintelui şi să antreneze sincopa - Posibilitatea formării de bule de azot în cavitatea pulpară: este o formă de accident de decompresie
	S	- Dureri dentare violente
	M	- Trebuie consultat un stomatolog - Eventual o recompresie în barocameră
	P	• *Înainte de scufundare*: - **Efectuarea unui examen buco-dentar** • *La coborâre* : **- La cea mai mică durere: trebuie urcat la suprafață şi anulată scufundarea** • *La urcare* : **- La cea mai mică durere: trebuie coborât câțiva metri, apoi se va efectua o urcare lentă**
Colicile scafandrilor (intestinele şi stomacul)	**C**	- Aer înghițit în stomac; Fermentare alimentară în timpul scufundării • *La urcare* : dilatarea gazelor; Dorința de evacuare a gazelor fără a putea
	S	- Dureri abdominale
	M	- Trebuie încercată evacuarea gazelor din stomac pe cale bucală şi din intestine, pe cale rectală; Trebuie consultat un medic - La nevoie se va efectua o recompresie în barocameră
	P	- **Înainte de scufundare nu trebuie consumate băuturi gazoase** - Trebuie evitată deglutiția pentru echilibrarea urechilor, deoarece aceasta conduce şi la înghițirea de aer - La nevoie, trebuie evacuate gazele în timpul scufundării
Suprapresiunea pulmonară	**C**	- Blocarea expirației la urcare - Aerul se dilată provocând explozia alveolelor pulmonare - Blocarea expirației poate fi datorată: blocajului glotei, spasmelor (anxietate, efort etc), malfomațiilor anatomice sau fiziologice, crizei de astm, emfizemului, blocării detentorului etc.
	S	- Durere toracică; Spută rozacee; Torax dilatat (emfizem subcutanat) - Diferite forme de paralizie (fără paraplegie) - Crize de tip epileptic; Stare de şoc ; Sincopă. Moarte
	M	- Oxigen normobar; Încălzire şi reconfortare - Transport de urgență către un centru de recompresie
	P	- **Expirație în timpul urcării, mai ales între 10 metri şi suprafață**

Tabelul 2.5

Accidente biofize (accidente de decompresie)

Tipul accidentului	Cauze (**C**), Simptome (**S**), Măsuri (**M**), Prevenire (**P**)	
Accidente de decompresie	**C**	În timpul scufundării, cantitatea de azot dizolvată creşte în funcție de tipul țesutului • *La urcare* : - Azotul reia starea gazoasă îndată ce se realizează suprasaturația: mici bule eliminate prin sânge şi respirație (microbule circulante) - Dacă urcarea este rapidă, bulele se măresc înaitea schimbului pulmonar→ blocarea circulației sanguine (embolie gazoasă) - Dacă în timpul urcării se efectuează manevra Valsalva sau se umflă vesta de salvare cu gura: hiperpresiune pulmonară, superioară presiunii microbulelor care nu pot traversa peretele alveolar. Ele se întorc în circulația sanguină. Presiunea ambiantă scăzând, bulele îşi măresc volumul → blocarea circulației sanguine - Dacă se depăşeşte suprasaturația critică: degajare necontrolată, bule mari → blocarea circulației, agravată prin creşterea bulelor la urcare până la transfomarea lor în dopuri gazoase în vasele sanguine - Orice blocare a circulației sanguine provoacă o anoxie a celulelor aflate în aval
	S	Depind de țesuturile atinse şi apar între momentul ieşirii din apă şi după 6 ore • Accidente cutanate: mâncărimi ale pielii: - Benigne, dar pot anunța un accident neurologic Sunt întâlnite mai ales la scafandrii cu costume etanşe sau la cei aflați în barocamere (respirație cutanată) • Accidente osteo-artro-musculare (benduri): o durere chinuitoare într-o articulație sau membru, din ce în ce mai acută • Accidente neurologice: atingerea unui centru nervos: Oboseală generală, paloare, angoasă; Dureri violente la nivelul omoplaților sau a vertebrelor lombare; Furnicături în membre, mai adesea în picioare; Imposibilitatea de a urina Pierderea simțurilor (auz, văz) şi a vorbirii; Paralizii: monoplegie, hemiplegie, cvadriplegie, paraplegie; Sincopă şi moarte • Accidente cu manifestări ORL (vestibulare): Amețeli, grețuri, audiție dificilă sau imposibilă; Datorate unei degajări în urechea internă (centrul audiției şi echilibrului) • Tulburări respiratorii: Insuficiență respiratorie acută, datorată degajării în artera pulmonară sau în una din ramurile sale
	M	- Se va aşeza corpul scafandrului în poziție înclintă (~30), cu capul în jos - Se va şterge corpul, se va încălzi şi se va liniăti scafandrul - Oxigenoterapie normobară: 8 ... 10 l/min la inhalație, 12l/min la insuflare - Dacă scafandrul este conştient, se va administra 0,5 g aspirină neefervescentă, iar după 30 min. încă 0,5 g

Tabelul 2.5 (continuare)

Tipul accidentului		Cauze (**C**), Simptome (**S**), Măsuri (**M**), Prevenire (**P**)
	P	- Se va da scafandrului să bea 1 până la 2 litri de apă dulce - Se va avea griă, dacă este posibil, ca accidentatul să urineze - Accidentatul nu va fi recomprimat în apă nici într-o barocameră monobloc - Se va transporta scafandrul de urgență la un centru de recompresie (barocameră) - Se vor nota în două exemplare toate datele scufundării: adâncime, durată, efort, viteză de urcare, paliere efectuate, ora de ieşire, ora de apariți şi natura simptomelor, ajutorul acordat Legată de factorii de dizolvare - Trebuie respectată viteza de urcare (15 m/min); Nu se vor schimba tabelele între 2 scufundări - Nu se va efectua manevra Valsalva nici la urcare, nici la palier - Se va evita efortul excesiv în timpul scufundării precum şi după scufundare - Nu se vor face scufundări în apnee după o scufundare cu butelie - Nu se va zbura cu avionul sau elicopterul decât după 12 ore de la terminarea scufundării - Nu se vor efectua scufundări în caz de oboseală fizcă sau psihică sau sub tratament medical - Trebuie cunoscut centrul de recompresie cel mai apropiat

Tabelul 2.6

Accidente biochimice (accidente toxice)

Tipul accidentului		Cauze (**C**), Simptome (**S**), Măsuri (**M**), Prevenire (**P**)
Accidente biochimice datorate azotului (narcoza azotului)	**C**	- Încă puțin cunoscute. Narcoza azotului apare la adâncimi variabile funcție de individ şi de tipul de activitate desfăşurată - Factor agravant: creşterea presiunii parțiale a bioxidului de carbon, p_{CO2}
	S	Senzație de euforie, de anxietate sau agresivitate. Accentuarea dialogului interior - Dificultate sau imposibilitate de a citi ceasul sau profundimetrul - Comportament irațional; Pierderea cunoştinței
	M	- Va fi scăzută presiunea parțială a zotului, p_{N2}, prin urcarea cu circa zece metri. - Dacă simptomele au dispărut, se va continua scufundarea fără să se coboare la o adâncime mai mare sau se va urca la suprafață - Se vor trata consecințele (spre exemplu înecul) - Nu se vor efectua scufundări prea adânci dacă scafandrul este obosit sau anxios
	P	- Nu se vor efectua scufundări prea adânci dacă scafandrul este obosit sau anxios - Scafandrul se va observa pe el şi îi va observa pe coechipieri - O bună cunoaştere a limitelor care nu vor fi depăşite fără a fi însoțit de un scafandru experimentat: Limitele frecvente de scufundare: 35 ... 40 m pentru scafandrii tineri şi 60 m pentru scafandrii experimentați

Tabelul 2.6 (continuare)

Tipul accidentului	Cauze (**C**), Simptome (**S**), Măsuri (**M**), Prevenire (**P**)	
Accidente biochimice datorate oxigenului		A. Hiperoxia A.1. Efectul Lorrain Smith
	C	- Presiunea parțială a oxigenului p_{O2} > 0,5 bar (sc. abs.). pe o durată de peste 2 ore
	S	- Fața roz; Jenă respiratorie; Tuse; Arsuri alveolare; Edem pulmonar
	M	- Scăderea presiunii parțiale a oxigenului p_{O2}; Tratament medical
	P	- Niciodată p_{O2} > 0,5 bar (sc. abs.) pe o durată mai mare de 2 ore
		A.2. Efectul Paul Bert
	C	- Oxigen pur: p_{O2} > 1,7 bar (sc. abs.); amestec (aer comprimat): p_{O2} > 2 bar (sc. abs.) sau p_{O2} > 1,7 bar (sc. abs.) conform medicilor specialişti
	S	- Fața roz; Vedere dublă, reducerea câmpului vizual; Contracții musculare, crampe - Criză de tip epileptic; Pierderea cunoştinței
	M	- Scăderea p_{O2}; Tratament medical
	P	- Condție fizică bună; Presiunea parțială a oxigenului să nu depăşească limita admisă (p_{O2} < 1,7 bar (sc. abs.)
		B. Hipoxia
	C	- Presiunea parțială a oxigenului p_{O2} < 0,17 bar (sc. abs.)
	S	- Accelerarea ritmului respirator; Tahicardie; Halucinații - Pierderea cunoştinței; Colaps; Stop respirator; Stop cardiac - Dacă presiunea parțială a oxigenului p_{O2} scade brusc, se produce pierderea cunoştinței, fără semne de avertizare
	M	- Creşterea p_{O2}; Oxigenoterapie
	P	- Presiunea parțială a oxigenului să nu fie mai mică decât limita admisă: p_{O2} > 0,17 bar (sc. abs.)
Accidente biochimice datorate bioxidului de carbon (hipercapnia)	**C**	- Creşterea presiunii pațiale a bioxidului de carbon (p_{CO2} > 45 mmHg) în sângele arterial • *Exogene* : - Aer respirat, Echipament; Creşterea spațiului mort (tubul de respirat) • *Endogene* : - Producere excesivă de CO_2 de către organism: frig, efort etc. Consecințe în scufundare: - Gâfâială (dispnee); Favorizează narcoza şi accidentul de decompresie
	S	- Accelerarea ritmului respirator; Ventilarea superficială; Dureri de cap - Transpirație, zgomote, greață; Sincopă • *În scufundare* : Idem plus: anxietate, comportament irațional: scoaterea piesei bucale → înec
	M	• *În apă*: - Se vor întrerupe eforturile; Se va alerta un coechipier (prin lovirea buteliei); Se va trage rezerva; Se vor face expirații profunde - Se va urca fără labele de înot (vestă de salvare asistat de un coechipier) - Simptomele vor dispare la atingerea unei adâncimi de cca 15 m • *Dacă apar dureri de cap după revenirea la suprafață:* Se va face o ventilare bună

Tabelul 2.6 (continuare)

Tipul accidentului		Cauze (**C**), Simptome (**S**), Măsuri (**M**), Prevenire (**P**)
	P	- La nevoie, se va respira oxigen normobar; Se va evita soarele - Pentru scufundarea următoare: o ventilare bună - *La adâncime*: nu se va face apnee, se vor face expirații forțate • *Echipament*: - Aer bun în butelie; Robinetul bine deschis - Detentorul bine reglat; Deschiderea rezervei la timp - Utilizarea costumului de scufundare; Tubul de respirat nu prea lung • *Scafandrul:* - Nu va fi niciodată singur; Nu va efectua eforturi excesive; - Va realiza o bună ventilare. Apnei expiratorii de control (3 sau 4 secunde) din timp în timp; O bună condiție fizică şi psihică. O bună tehnicitate - Nu va efectua scufundarea dacă va constata un început de gâfâială la suprafață

2.2. RESPIRAȚIA. PROCESELE RESPIRAȚIEI. RESPIRAȚIA ÎN HIPERBARISM

Respirația constă din totalitatea proceselor care privesc transportul oxigenului din ambianță la țesuturi şi transportul dioxidului de carbon, rezultat din oxidările tisulare, înapoi în ambianță.

Ambianța se referă la mediul gazos din care respiră omul şi care poate fi:

– *aerul la presiunea atmosferică*, atunci când omul respiră aer direct din atmosferă sau din incinte normobare (incinte etanşe, cu aer la presiunea atmosferică, aşa cum sunt camerele normobare ale submarinelor);
– *aerul la presiune mai mare ca presiunea atmosferică*, atunci când scafandrul respiră din aerul sub presiune aflat în interiorul incintelor hiperbare (barocamere, turele presurizabile, camere hiperbare de submarin) sau din aerul livrat direct la respirație, de către aparatele de respirat sub apă, la presiuni corespunzătoare adâncimii de imersie;
– *amestecurile respiratorii sintetice* (NITROX, HELIOX, TRIMIX), atunci când scafandrul respiră din amestecurile gazoase binare sau ternare sub presiune aflate în interiorul incintelor hiperbare sau din amestecurile gazoase sintetice livrate direct la respirație de către aparatele de respirat, la presiuni corespunzătoare adâncimilor de imersie;
– *oxigenul pur*, atunci când scafandrul respiră oxigen livrat de aparatele de respirat, la presiune atmosferică sau la presiuni egale cu presiunile corespunzătoare adâncimilor de imersie.

2.2.1. ETAPELE RESPIRAȚIEI

Procesele de transport ale oxigenului şi dioxidului de carbon pot fi sistematizate astfel:

– respirația externă, ce reprezintă schimbul gazos între plămâni şi mediul ambiant;
– respirația internă, ce reprezintă schimbul gazos între sânge şi țesuturi.

Procesele respirației constau în şase stadii diferite (fig. 2.6):
– ventilația plămânilor sau ventilația alveolară;
– schimbul gazos între alveole şi sânge;
– transportul gazului cu ajutorul sângelui;
– schimbul gazos între sânge şi țesuturi;
– difuzia gazoasă prin țesuturi şi celule;
– metabolismul propriu-zis.

2.2.2. FUNCȚIA SÂNGELUI ÎN PROCESUL RESPIRAȚIEI

Sângele transportă oxigenul spre țesuturi în două moduri:
– în combinație chimică cu hemoglobina;
– în soluție fizică, dizolvat în plasmă.

Pentru a determina cantitatea de oxigen transportată în combinație chimică, se pleacă de la faptul că 100 mℓ de sânge conține 15 g hemoglobină. Se cunoaşte că 1 mol de oxigen se combină cu 16,7 g hemoglobină, iar în condiții de temperatură şi presiune normale, 1 mol de oxigen ocupă 22,4 ℓ_N. Indicele *N* se referă la faptul că volumele de gaz şi debitele de gaz sunt exprimate la condiții normale (presiunea atmosferică şi temperatura de 293,16 K).

Se poate scrie:

$$\frac{22,4\times10^3\ \mathrm{m}\ell_N\,\mathrm{O}_2}{16,7\ g\ \text{hemog.}}=1,34\ \mathrm{m}\ell_N\,\mathrm{O}_2/g\ \text{hemoglobină} \tag{2-1}$$

deci, cu alte cuvinte, fiecare gram de hemoglobină fixează 1,34 mℓ_N de oxigen, deci 100 mℓ sânge, la o saturare completă, transportă circa 20,1 mℓ_N oxigen ($15\ g\times1,34\ \mathrm{m}\ell_N\,\mathrm{O}_2/g=20,1\ \mathrm{m}\ell_N\,\mathrm{O}_2$).

Cantitatea de oxigen dizolvată în plasmă depinde, direct proporțional, de presiunea parțială a oxigenului din amestecul respirator precum şi de solubilitatea acestuia. Coeficientul de solubilitate al oxigenului în plasmă este de 0,023 la presiunea de 760 mmHg, ceea ce înseamnă că 1 mℓ de plasmă conține 0,023 mℓ_N oxigen. Cum presiunea parțială a oxigenului în sângele arterial este de 100 mmHg, cantitatea de oxigen conținută de 1 mℓ de plasmă la 100 mmHg este:

$$\frac{0,023\times100}{760}=0,003\ \mathrm{m}\ell_N.\ \mathrm{O}_2 \tag{2-2}$$

Cantitatea de oxigen consumată într-un minut de un organism în repaus este de aproximativ 250...300 mℓ_N, oxigen ce trebuie transportat în sângele pompat de inimă la debitul de 4...5 ℓ/min. Dacă această cantitate de oxigen ar trebui transportată exclusiv sub formă dizolvată, ar fi necesar un debit sanguin de 83...120 ℓ/min, ceea ce este practic imposibil de realizat în condiții normale. La un efort maximal, debitul cardiac atinge valoarea de 38 ℓ/min de sânge, iar consumul de oxigen ajunge până la 3 ℓ_N/min. Şi în acest caz, dacă întreaga cantitate de oxigen necesar metabolismului ar trebui transportată numai sub formă dizolvată, aceasta ar necesita un debit de sânge cu mult mai mare decât debitul cardiac normal la acest regim de efort.

Ceea ce nu poate fi realizat în condiții normale poate fi realizat în scufundare, adică în condiții de respirație la presiuni mai mari decât presiunea atmosferică (condiții hiperbare). Scufundarea influențează mai puțin transportul pe cale chimică a oxigenului, deoarece saturarea hemoglobinei nu depăşeşte în general 96% dar, influențează foarte mult transportul în soluție fizică, sub formă dizolvată. Creşterea presiunii parțiale a oxigenului la 2,6 bar (sc. abs.) înseamnă o cantitate de oxigen dizolvată în plasmă şi transportată la țesuturi de:

$$2{,}6 \times 2{,}3 = 6 \ \mathrm{m}\ell_N \ \mathrm{O_2} / 100 \ \mathrm{m}\ell_N \ \text{sânge} . \qquad (2\text{-}3)$$

În condiții de repaus, inima pompând un debit de sânge de 4...5 ℓ/min, asigură transportul sub formă dizolvată, spre țesuturi, a unui debit de oxigen de 240...300 mℓ_N/min, ceea ce este suficient pentru satisfacerea nevoilor metabolice ale tuturor țesuturilor, în condiții de repaus.

2.2.3. RESPIRAȚIA EXTERNĂ

Respirația externă este parte din ansamblul proceselor respirației, cu acțiune nemijlocită la interfața om–aparat de respirat sub apă. Pe timpul mişcărilor respiratorii apare un debit de gaz (gaz pur sau amestec de gaze) în căile respiratorii şi în circuitele aparatului de respirat, iar forțele dezvoltate ca urmare a contracțiilor muşchilor respiratori se opun, atât forțelor de retracție elastică a plămânilor şi forțelor de frecare ce apar la curgerea gazului prin căile respiratorii anatomice, cât şi forțelor de frecare ce apar la curgerea gazului respirator prin circuitele aparatului de respirat. Principala cauză a pierderilor de sarcină în aparatele de respirat o constituie forțele de frecare datorate eforturilor tangențiale de vâscozitate ce apar în masa gazului aflat în mişcare prin circuitele anatomice şi artificiale. Energia cinetică a moleculelor de gaz în mişcare se transformă în energie termică, ulterior pierdută.

Rezistența respiratorie se măsoară în unitățiі de presiune pe debit de ventilație: cm H_2O/ℓ/s.

Pentru ca respirația să se poată menține în limitele normale se procedează, de obicei, la accelerarea gazelor ce trec prin căile respiratorii anatomice şi ale aparatului de respirat. Spre exemplu, debitul detentorului treapta a II-a a aparatului de respirat sub apă în circuit deschis atinge valori de 300...400 ℓ_N/min, la o depresiune creată de 3...5 cm H_2O.

Ventilația este una dintre funcțiile fundamentale ale plămânilor şi depinde de frecvența respirației, de mărimea volumului curent şi a spațiului mort. Spațiul mort anatomic este de aproximativ 150 mℓ, ceea ce reprezintă volumul de gaz care nu participă la schimburile respiratorii. În tabelul 2.7 sunt prezentate caracteristicile funcției pulmonare pentru un scafandru tânăr şi sănătos, în poziția "repaus culcat", iar în tabelul 2.8 sunt prezentate valorile mărimilor caracteristice principale ale mecanicii respiratorii. În figura 2.19 sunt prezentate grafic capacitățile pulmonare normale.

Estimarea volumului spațiului mort este foarte importantă. Se cunoaşte că dioxidul de carbon conținut de gazul expirat este în proporție de 3,7…4%. Deci, participația volumică a dioxidului de carbon în amestecul gazos expirat este $r_{CO_2} = 0{,}037...0{,}04$. Printr-o simplă însumare rapidă a gazelor produse, neglijându-se inegalitatea dintre volumul gazului inspirat şi volumul gazului expirat, se pot determina efectele ipotetice ale spațiului mort de adaus asupra respirației.

Tabelul 2.7

Caracteristicile funcției pulmonare pentru un scafandru tânăr şi sănătos, în poziția "repaus culcat" (după *Comroe şi col.*)

Volumele plămânului [mℓ]		Ventilația	
Capacitatea vitală	4800	Minut volumul	6000 mℓ/min
– volumul inspirator de rezervă	3100	Debitul curent	500 mℓ/min
– volumul curent	500	Frecvența respiratorie	12 resp/min
– volumul expirator de rezervă	1200	Spațiul mort respirator	150 mℓ
Capacitatea totală	6000	Ventilația alveolară	4200 mℓ/min
– capacitatea vitală	4800	Gazul alveolar şi sângele arterial	
– volumul rezidual	1200	p_{O_2} alveolară	104 mmHg
Capacitatea reziduală funcțională	2400	p_{CO_2} alveolară	40 mmHg
– volumul expirator de rezervă	1200	Saturarea cu oxigen	98%
– volumul rezidual	1200	p'_{O_2} arterială	95 mmHg
Capacitatea inspiratorie	3600		
– volumul inspirator de rezervă	3100	p'_{CO_2} arterială	40 mmHg
– volumul curent	500		
Capacitatea totală	6000	Schimbul gazos în condiții normale	
– capacitatea inspiratorie	3600	Consum de oxigen	250 mℓ/min
– capacitatea reziduală funcțională	2400	Producția de CO_2	200 mℓ/min
		Câtul respirator	0,8

Obs.: p_{O_2} şi p_{CO_2} reprezintă presiunile parțiale ale oxigenului şi respectiv dioxidului de carbon, iar p'_{O_2} şi p'_{CO_2} reprezintă tensiunile aceloraşi gaze dizolvate în sângele arterial.

Tabelul 2.8

Mărimi caracteristice privind mecanica respiratorie
(după *Comroe şi col.*)

Mărimi caracteristice	Valori
Ventilația voluntară maximă	170 ℓ/min
Debitul expirator maxim	>400 ℓ/min
Debitul respirator maxim	>300 ℓ/min
Rezistența căilor aeriene	1,6 cmH_2O/ℓ/s
Rezistența pulmonară	1,9 cmH_2O/ℓ/s
Energia respirației liniştite (într-un minut)	0,5 kgf·m/min
Lucrul mecanic maxim al respirației	10 kgf·m/resp
Presiunea maximă inspiratorie şi expiratorie	60…100 mmHg

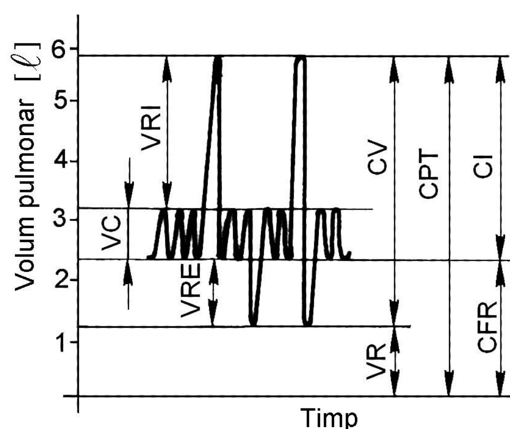


Fig. 2.19. Volumele şi capacităţile pulmonare normale:
VC – volumul curent;
VRI – volumul de rezervă inspirator;
VRE – volumul de rezervă expirator;
CV – capacitatea vitală;
CI – capacitatea inspiratorie;
CRF – capacitatea reziduală funcţională;
VR – volumul rezidual;
CPT – capacitatea pulmonară totală.

Se numeşte spaţiu mort volumul căilor aeriene conducătoare unde nu există schimburi importante de O_2 şi CO_2 între gaz şi sânge. Datorită faptului că gazul imobilizat în spaţiul mort nu suferă nici o modificare, se deduce faptul că volumul curent trebuie să fie mai mare ca spaţiul mort astfel încât respiraţia să fie eficace. Această noţiune este important să fie considerată atunci când se utilizează o tehnică de respiraţie artificială; dacă metoda utilizată nu aduce un volum curent important, ventilaţia pulmonară este ineficace. Spaţiul mort se măreşte atunci când ventilaţia pulmonară se produce prin intermediul unui tub unic atât pentru inspir cât şi pentru expir. Utilizarea unui tub de respirat de către scufundătorul în apnee, îl obligă pe acesta la mărirea volumului curent. Dacă tubul este prea lung, ventilaţia pulmonară eficace devine imposibilă. În schimb, utilizarea de supape care să permită gazelor inspirat şi expirat de a urma căi diferite nu conduce la mărirea spaţiului mort şi nu obligă limitarea lungimii tuburilor utilizate (vezi supapele piesei bucale de la aparatele de respirat sub apă în circuit deschis, semiînchis şi închis).

În tabelul 2.9 se prezintă efectele spaţiului mort asupra concentraţiei de dioxid de carbon din amestecul respirator inhalat.

Tabelul 2.9

Efectele spaţiului mort asupra concentraţiei de dioxid de carbon din amestecul respirator inhalat

Volumul curent [$m\ell$]	Spaţiul mort al aparatului [$m\ell$]	Dioxidul de carbon în spaţiul mort [$m\ell$]	Procentele de CO_2 inhalat [%]
500	50	2	0,4
500	500	20	4,0
1000	50	2	0,2
1000	500	20	2,0

La presiunea atmosferică, inspirarea unui amestec de gaze ce conţine dioxid de carbon în proporţie de 2%, deci a unui amestec la care participaţia volumică a dioxidului de carbon este $r_{CO_2}=0{,}02$, iar presiunea parţială a acestuia este $p_{CO_2}=r_{CO_2}\times p_{at}=0{,}02\times 1=0{,}02$ bar (sc. abs.) = 20 mbar (sc. abs.), este tolerată de

organism deşi apare o oarecare creştere a ritmului şi amplitudinii respirației. Acelaşi amestec, dacă s-ar respira la adâncimea de 15 m, adică la o presiune totală de p = 2,5 bar (sc. abs.), ceea ce înseamnă o presiune parțială a dioxidului de carbon $p_{CO_2} = r_{CO_2} \times p = 0{,}02 \times 2{,}5 = 0{,}05$ bar (sc. abs.) = 50 mbar (sc. abs.), nu poate fi tolerat decât accidental şi pe o durată de maximum 30 min. În tabelul 2.10 sunt arătate efectele intoxicării cu dioxid de carbon la presiunea atmosferică, iar în tabelul 2.11 sunt prezentați timpii limită de expunere a scafandrului la presiuni parțiale ale dioxidului de carbon, p_{CO_2} ridicate.

Tabelul 2.10

Etapele ce definesc intoxicația cu CO_2 la presiunea atmosferică

% CO_2	Efectele intoxicației
2	Creşterea ritmului şi amplitudinii respirației
5	Hiperventilație
7	Intoxicație cu CO_2, dispnee, tulburări mentale
peste 10	Dispnee progresivă, durere respiratorie violentă, inconştiență, spasm neuromuscular şi convulsii

Dacă sunt cunoscute concentrațiile dioxidului de carbon în gazul alveolar şi în gazul expirat, precum şi volumul gazului expirat, pot fi folosite relațiile lui Bohr pentru determinarea volumului spațiului mort, deduse în continuare.

Tabelul 2.11

Timpi limită de expunere a scafandrului la presiuni parțiale ale CO_2 (p_{CO_2}) ridicate (presiunile parțiale sunt exprimate în scară absolută)

p_{CO_2} [mbar]	Timp de expunere [ore]	Observații privind expunerea scafandrului
50	0,5	Poate fi tolerată în caz de necesitate în turele
40	2,0	Tolerabilă la expuneri excepționale
30	2…8	Tolerabilă la expuneri excepționale
20	8…24	Maximă autorizată în operațiuni de scufundare
10	nelimitat	Expunere maximală normală în incinte hiperbare
6	nelimitat	Expunere maximală, optimă, pentru ambianțe hiperbare la scufundări în saturație

Volumul gazului expirat, V_E, egal cu volumul curent, este suma volumului gazului alveolar, V_A, şi a volumului gazului din spațiul mort, V_M:

$$V_E = V_A + V_M \,. \tag{2-4}$$

Volumul dioxidului de carbon din gazul expirat este:

$$V_E \times r_{E,CO_2} = V_A \times r_{A,CO_2} + V_M \times r_{M,CO_2} \tag{2-5}$$

unde:

r_{E,CO_2} este participația volumică a dioxidului de carbon în gazul expirat;
r_{A,CO_2} – participația volumică a dioxidului de carbon în gazul alveolar;
r_{M,CO_2} – participația volumică a dioxidului de carbon în gazul rezidual.

La începutul expirului, gazul din spațiul rezidual are aceeaşi compoziție ca şi gazul inspirat:

$$V_E \times r_{E,CO_2} = V_A \times r_{A,CO_2} + V_M \times r_{I,CO_2}, \qquad (2\text{-}6)$$

unde r_{I,CO_2} este participația volumică a dioxidului de carbon în gazul inspirat, sau:

$$V_E \times r_{E,CO_2} = (V_E - V_M) \times r_{A,CO_2} + V_M \times r_{I,CO_2}. \qquad (2\text{-}7)$$

Volumul spațiului mort va fi:

$$V_M = \frac{r_{E,CO_2} - r_{A,CO_2}}{r_{I,CO_2} - r_{A,CO_2}} \times V_E. \qquad (2\text{-}8)$$

Neglijând valoarea concentrației dioxidului de carbon din amestecul inspirat, $r_{I,CO_2} = 0$, se obține următoarea expresie pentru volumul spațiului mort, cunoscută sub numele de relația lui Bohr:

$$V_M = \frac{r_{A,CO_2} - r_{E,CO_2}}{r_{A,CO_2}} \times V_E. \qquad (2\text{-}9)$$

Spre exemplu, dacă volumul expirat (volumul curent) este $V_E = 450$ mℓ, participațiile volumice ale dioxidului de carbon din gazul alveolar şi din gazul expirat sunt $r_{A,CO_2} = 0{,}06$ şi respectiv $r_{E,CO_2} = 0{,}04$, volumul spațiului mort V_M rezultă:

$$V_M = \frac{0{,}06 - 0{,}04}{0{,}06} \times 450 = 150 \text{ m}\ell.$$

Se poate face o analogie între ventilația alveolară şi ventilația măştii faciale sau a căştii scafandrului greu. Există o strânsă legătură între volumul de dioxid de carbon din spațiul închis, volumul gazului de ventilație al spațiului şi concentrația dioxidului de carbon din acest spațiu.

2.2.4. REZISTENȚA LA RESPIRAȚIE

Frecarea moleculelor gazului aflat în mişcare prin căile respiratorii anatomice şi ale aparatului de respirat, conduc la disipări ale energiei gazului, alterând respirația normală. De aceea, pentru a menține un debit respirator adecvat este necesară creşterea presiunii amestecului gazos la inspirație. Acest lucru nu înseamnă, obligatoriu, micşorarea rezistenței la respirație. În aceste condiții, de obicei, expirația se prelungeşte iar stimulul pentru inspirație apare înainte de terminarea fazei de expirație, ceea ce conduce la o stare de hiperventilație relativă. Astfel, ventilația alveolară se compromite progresiv şi, cum producerea dioxidului de carbon creşte cu intensitatea muncii subacvatice, este necesară compensarea aparatului respirator. Nu trebuie omisă nici acțiunea specifică a dioxidului de carbon în exces în mecanismul de producere a narcozei, în potențarea efectului hiperbar şi chiar în formarea bulelor la decompresie.

Rezistența de frecare, ca forță dinamică a respirației, împreună cu rezistențele inerțiale, formează rezistența neelastică a respirației. Raportul dintre căderea de presiune datorată frecărilor şi debitul de gaz care, circulând prin sistem, conduce la respectiva cădere de presiune, este rezistența specifică. Căderea de presiune este funcție de dimensiunile caracteristice circuitelor aferente aparatului respirator, de debitul de amestec gazos şi de proprietățile fizice ale amestecului de gaze respiratorii. Totuşi, trebuie menționat faptul că relația dintre debitul de gaz şi căderea de presiune, în cazul sistemului de față, corespunde într-o mică măsură, deoarece căile aeriene anatomice sunt elastice, schimbându-şi dimensiunile pe timpul respirației. La un adult normal, rezistența medie specifică este de aproximativ 2 $cmH_2O/\ell/s$.

În vederea cuantificării elasticității țesuturilor se foloseşte noțiunea de complianță pulmonară, care este inversul elastanței. Complianța pulmonară reprezintă variația volumului pulmonar, în litri, raportată la variația presiunii intrapulmonare exprimată în cmH_2O:

$$C = \frac{\Delta V_p}{\Delta p_{ip}}, \quad (2\text{-}10)$$

unde:

ΔV_p este variația volumului pulmonar, (ℓ);

Δp_{ip} – variația presiunii intrapulmonare, (cmH_2O).

La un individ normal, complianța variază între 0,130 şi 0,200 ℓ/cmH_2O.

Valoarea complianței variază individual, direct proporțional cu volumul pulmonar. Volumul pulmonar este funcție de surfactant, o substanță tensioactivă care "tapetează" alveolele. Surfactantul este afectat de oxigenul hiperbar, ceea ce duce la o scădere a capacității vitale şi implicit a complianței.

2.2.5. LUCRUL MECANIC AL RESPIRAȚIEI

Lucrul mecanic al muşchilor respiratori învinge rezistențele elastice, neelastice şi de frecare rezultate la mişcarea aerului sau a amestecului respirator gazos prin căile respiratorii şi ale țesutului pulmonar. În respirația liniştită, 60% din energia muşchilor respiratori se consumă pentru învingerea rezistenței elastice, 40% pentru învingerea rezistenței neelastice (vâscoase) şi o cantitate neglijabilă pentru învingerea rezistenței viscerelor. O dată cu creşterea frecvenței respirației creşte şi rezistența elastică, iar rezistența neelastică scade, deoarece aerul pendulează în spațiul mort, unde rezistența este mai mică.

Pentru a asigura deplasarea aerului în căile respiratorii, la un individ aflat în repaus, se cheltuieşte o energie de 0,5 kgf·m într-un minut, ceea ce revine la o energie de 720 kgf·m cheltuită într-o zi, echivalentă cu 1,7 kcal. Randamentul cel mai ridicat al muşchilor respiratori fiind de 10%, înseamnă că în 24 ore se cheltuiesc 150...200 kcal, adică 1% din consumul energetic bazal (*I. Baciu*, 1977) sau după alți autori 0,6% din consumul energetic bazal (*W. Penzias, M. W. Goodman*, 1973).

Din specificațiile Biroului Minelor din S.U.A. se notează următoarele caracteristici maximale pentru filtrul respirator: 5 cmH_2O la inspirație şi 2,5 cmH_2O la expirație, sau un total de 7,5 cmH_2O la un debit de 85 ℓ/min. În tabelul 2.12 sunt prezentate măsurătorile efectuate asupra debitului respirator pentru diferite activități, după *Silverman şi col*.

Tabelul 2.12

Măsurători asupra debitului aerului respirator pentru diferite activități
(după *Silverman* şi *col.*, 1951)

Consumul energetic		Numărul subiecților	Volumul respirator minim într-un minut [ℓ]	Debitul maxim [ℓ/min]		Debitul de oxigen consumat [mℓ/min]	Producția de CO_2 [mℓ/min]	Câtul respirator *k* [-]
				inspir	expir			
Sedentar	1	29	10,3	40	32	306	261	0,853
	2	13	9,1	37	29	304	259	0,852
Repaus	1	12	14,2	49	43	496	425	0,857
	2	12	13,2	44	37	496	416	0,856
[kgf·m/min] 208	1	12	20,8	63	58	800	695	0,869
	2	12	19,8	60	56	812	709	0,873
415	1	14	29,9	84	85	1172	1068	0,911
	2	12	27,0	78	77	1159	1039	0,896
622	1	12	37,3	100	107	1545	1432	0,927
	2	12	36,2	101	105	1606	1482	0,923
830	1	59	54,7	149	154	2075	2017	0,972
	2	48	48,9	128	144	2052	1976	0,962
1107	1	46	75,3	194	211	2723	2723	1,000
	2	22	64,4	160	195	2591	2621	1,012
1384	1	8	104,0	254	314	3114	3399	1,091
	2	6	81,3	192	252	3033	3231	1,065
1660	1	6	113,8	286	322	3413	3598	1,054
	2	3	90,3	240	240	3245	3450	1,063

2.2.6. MĂRIMI CARACTERISTICE ALE RESPIRAȚIEI

În cele ce urmează se prezintă, pe scurt, principalele mărimi caracteristice ale respirației, utile în analiza problemelor de hiperbarism.

- Complianța:

$$C = \frac{\Delta V_p}{\Delta p_{ip}} \quad (\ell/\text{cmH}_2\text{O}), \qquad (2\text{-}11)$$

unde $\Delta V_p = V_c$ (volumul curent).

- Presiunea intrapulmonară:

$$p_{ip} = \frac{V_c}{C} \quad (\text{cmH}_2\text{O}). \qquad (2\text{-}12)$$

- Energia elastică într-un minut:

$$W_e = \frac{p_{ip} \cdot V_c}{2} = \frac{V_c^2}{2C} \quad \text{(kgf/m).} \tag{2-13}$$

- Energia de rezistență:

$$W_r = 2 k V_c^2 f , \tag{2-14}$$

unde k este câtul respirator definit prin expresia:

$$k = \frac{\text{Producția de } CO_2}{\text{Consumul de } O_2} , \tag{2-15}$$

iar f este ritmul respirator (resp/min).

- Energia totală:

$$W_t = (W_e + W_r) f , \tag{2-16}$$

sau

$$W_t = \left(\frac{V_c^2}{2C} + 2 k V_c^2 \right) f . \tag{2-17}$$

Consumul de oxigen pe timpul respirației, în condiții de repaus este de 0,3…2,0 mℓ/ℓ de ventilație, sau aproximativ 2% din consumul total de oxigen.

Eficiența respiratorie la un subiect normal variază între 3% și 10%. Eficiența respiratorie reprezintă raportul dintre lucrul mecanic și consumul de oxigen.

Energia consumată într-un minut la o respirație liniștită este de 0,5 kgf·m/s, ceea ce corespunde unei puteri de 0,5 kgf·m/s sau de $8,33 \times 10^{-3}$ kgf·m/s, sau de 0,0817 W, la o rezistență de 1,2...2,0 cmH_2O/ℓ/s și un debit de 0,5 ℓ/s.

Lucrul mecanic al ventilației maxime este de 15...20 ori mai mare decât în cazul respirației în repaus, ceea ce necesită o creștere de 300...500 ori a lucrului mecanic respirator ($\pm$10 kgf·m/respirație; $\pm$300...350 kgf·m într-un minut, la o frecvență respiratorie de 30 respirații pe minut ceea ce corespunde unei puteri de 300...350 kgf·m/min).

Rezistența standard: 830 kgf·m (muncă grea) pot fi consumați într-un minut la o rezistență a căilor respiratorii de 10,6 cmH_2O (inspirație) și 4,7 cmH_2O (expirație), măsurați la debitul de 85 ℓ/min; pentru 1107 kgf·m/min (muncă foarte grea) nivelele corespunzătoare sunt 6,4 cmH_2O și respectiv 4,1 cmH_2O; există un disconfort dacă rezistența la expirație depășește rezistența la inspirație și dacă totalul este mai mare de 5 cmH_2O la un debit de 85 ℓ/min.

Observație. Și în acest paragraf, ca și în celelalte paragrafe ale acestui capitol, toate volumele de gaz sau debitele de gaz sunt exprimate în condiții normale (la presiune atmosferică, $p = p_{at}$ și la temperatură $T = 293,16\,K$).

2.2.7. MODIFICĂRI ALE MECANICII RESPIRATORII ÎN HIPERBARISM

Prin pătrunderea omului în mediul subacvatic, impropriu modului său obișnuit de viață, utilizând aparate de respirat sub apă, apar modificări în mecanica respiratorie. Cauzele acestor modificări sunt legate de creșterea presiunii hidrostatice ambiante, de creșterea presiunii gazului (amestecului de gaze) respirat, egală cu presiunea corespunzătoare adâncimii de imersie, de creșterea densității gazului (amestecului de gaze) respirat, de scăderea temperaturii, de variațiile locale de presiune și de suplimentarea rezistenței respiratorii totale prin adăugarea unei rezistențe gazodinamice

exterioare datorate aparatului de respirat sub apă. Funcția respiratorie este deci primordial şi imediat implicată în reacția organismului scafandrului şi în adaptarea acestuia la mediul hiperbar.

O condiție necesară pentru asigurarea unei respirații confortabile în hiperbarism constă în faptul că, indiferent de tipul aparatului de respirat sub apă, acesta trebuie astfel conceput încât să furnizeze scafandrului gaz (amestec de gaze) respirator la o presiune egală cu presiunea mediului ambiant. Este evident că, o dată cu creşterea adâncimii de scufundare, creşte şi densitatea gazului (amestecului de gaze) respirator. Aceasta conduce la creşterea rezistenței căilor respiratorii, proporțională cu densitatea gazului respirat. În consecință, respirația scafandrului devine tot mai amplă, volumul curent creşte, iar frecvența respiratorie scade la valori de 10...12 respirații pe minut.

La utilizarea aparatului de respirat sub apă frecvența respiratorie scade cu 22,5...24,8%, fiind asociată cu o creştere a amplitudinii respirației (106...109%).

Reducerea frecvenței respiratorii este explicată ca o adaptare la lucrul mecanic respirator crescut şi se datorează atât rezistenței interne sporite[*)], cât şi rezistenței introduse de aparatul de respirat.

Spre deosebire de condițiile normobare unde expirația este un proces pasiv, creşterea presiunii ambiante determină intrarea în acțiune a muşchilor expiratori. Astfel, expirația în hiperbarism devine activă, iar efortul respirator depus de scafandru creşte.

Cunoaşterea volumului mort anatomic este importantă în vederea proiectării aparatelor de respirat. La alegerea debitului nominal de gaz respirator ce trebuie livrat de către aparat, este necesar să se țină cont de cei 150 mℓ din volumul curent pe care organismul nu-i utilizează, la care se adaugă spațiul mort tehnic introdus de aparatul de respirat. Dacă debitul de gaz respirator livrat de aparat este prea mic şi dacă acoperă numai suma spațiilor anatomic şi tehnic, ventilația alveolară nu poate avea loc. Creşterea volumului mort prin utilizarea aparatului de respirat sub apă conduce la amplificarea mişcărilor respiratorii ale scafandrului.

Prin urmare, față de creşterea lucrului mecanic respirator, organismul se adaptează prin mărirea amplitudinii şi reducerea frecvenței respiratorii. Economisirea efortului ventilator este mult facilitată prin inhalarea gazelor mai puțin dense şi prin utilizarea de aparate de respirat cu rezistență redusă.

Trebuie menționat şi faptul că cercetările efectuate la Laboratorul Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri Constanța, au pus în evidență existența unei influențe a echipamentului (costum, centură de lestare, aparat de respirat) asupra parametrilor ventilatori ai scafandrului. Influența este cu atât mai mare cu cât costumul este mai strâns pe torace (mai mare la costumul de neopren decât la cel etanş cu volum constant). De asemenea, centura de lestare limitează distensia abdomenului în timpul coborârii diafragmului, iar aparatul autonom de respirat limitează în plus, prin greutatea lui şi prin sistemul de fixare, expansiunea toracelui în timpul inspirației, scafandrul fiind mai aproape de limita disfuncției respiratorii.

[*)] Rezistența căilor respiratorii creşte cu adâncimea dublându-se la 4 bar (sc. abs.); creşterea se realizează în special pe seama rezistenței respiratorii şi se accentuează în apa rece.

3.

ECHIPAMENTE DE SCUFUNDARE ŞI APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ UTILIZATE ÎN SCUFUNDAREA PROFESIONALĂ

Necesitatea efectuării de observaţii şi intervenţii sub apă în vederea stabilirii existenţei resurselor şi posibilităţilor de valorificare a acestora, efectuării de lucrări de foraj şi extracţie off-shore, realizării şi exploatării instalaţiilor şi construcţiilor subacvatice, precum şi în vederea realizării unor misiuni cu caracter militar, a condus la conceperea, proiectarea şi realizarea de echipamente specializate pentru pătrunderea omului sub apă şi de aparate de respirat sub apă.

3.1. CLASIFICAREA ECHIPAMENTELOR DE SCUFUNDARE

Echipamentele pentru pătrunderea omului sub apă[*)] se pot împărţii în două mari categorii:

a) Echipamente care protejează omul de presiunea exterioară a mediului acvatic şi care permit omului să respire aer la presiunea atmosferică, acesta nefiind în contact cu mediul acvatic exterior. Din această categorie de echipamente, cunoscute şi sub denumirea de *echipamente de scufundare în presiune atmosferică*, fac parte turelele de observaţie, submarinele, batiscafele şi scafandrul rigid;

b) Echipamente cu care omul pătrunde sub apă, în echipresiune cu mediul acvatic exterior. Aceste *echipamente în echipresiune* pot fi împărţite, la rândul lor, în două grupe:

- echipamente în echipresiune în care omul este ferit de agresiunea mediului exterior. Din această grupă de echipamente, denumite echipamente hiperbare, fac parte turelele presurizabile, camerele hiperbare ale submarinelor purtătoare de scafandri şi casele (laboratoarele) subacvatice. Aceste echipamente constituie mijloace imersate din care scafandrul poate ieşi în mediul acvatic exterior, fără ecluzare.
- echipamente în echipresiune cu ajutorul cărora omul pătrunde nemijlocit în mediul acvatic, presiunea exterioară fiind transmisă direct corpului scafandrului. Aceste echipamente pot, la rândul lor, să fie umede (echipamente izotermice din neopren), sau uscate (echipamente cu volum constant), iar scafandrii echipaţi cu astfel de echipamente pot pătrunde în mediul acvatic fie direct de la suprafaţă, fie prin intermediul echipamentelor hiperbare în echipresiune care constituie mijloace imersate purtătoare de scafandri.

[*)] În lucrare, prin echipamente de pătrundere a omului sub apă se înţelege ansamblul sistemelor hiperbare şi instalaţiilor aferente, care echipează navele specializate în scufundări, precum şi costumele care servesc la echiparea individuală a scafandrilor.

În tabelul 3.1 sunt prezentate diferite tipuri de echipamente de scufundare proprii diferitelor tipuri de scufundări, corespunzătoare diferitelor adâncimi de intervenţie.

Tabelul 3.1

Tabel privind tipul scufundării, amestecul respirator folosit, aplicaţiile şi echipamentul utilizat, funcţie de adâncimea de scufundare

<table>
<tr><th>Adâncimea [m]</th><th>Presiunea [ata]</th><th colspan="2">Tipul scufundării şi amestecul respirator folosit (aplicaţie)</th><th>Echipamentul de scufundare utilizat</th></tr>
<tr><td>0</td><td>1</td><td rowspan="2">Scufundare cu oxigen (militară)</td><td rowspan="7">Scufundare cu aer sau cu amestecuri binare şi ternare (sportivă, industrială, militară)</td><td rowspan="3">Scafandru greu
Scafandru autonom
Narghilea alimentată de la suprafaţă</td></tr>
<tr><td>10</td><td>2</td></tr>
<tr><td>20</td><td>3</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>30</td><td>4</td><td rowspan="14">Turelă de scufundare presurizată, casă submarină, submersibil purtător de scafandri

Turelă de scufundare plecând din barocamere de punte (pe barje, platforme, nave specializate)</td></tr>
<tr><td>40</td><td>5</td><td rowspan="5">Scufundare de adâncime cu aer (sportivă)</td></tr>
<tr><td>50</td><td>6</td></tr>
<tr><td>60</td><td>7</td></tr>
<tr><td>70</td><td>8</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>80</td><td>9</td></tr>
<tr><td>90</td><td>10</td><td colspan="2" rowspan="12">Scufundare de adâncime cu amestecuri HELIOX.
Scufundare profesională unitară*) sau de saturaţie**)</td></tr>
<tr><td>100</td><td>11</td></tr>
<tr><td>110</td><td>12</td></tr>
<tr><td>120</td><td>13</td></tr>
<tr><td>130</td><td>14</td></tr>
<tr><td>140</td><td>15</td></tr>
<tr><td>150</td><td>16</td></tr>
<tr><td>160</td><td>17</td></tr>
<tr><td>170</td><td>18</td><td rowspan="9">Sistem hiperbar de saturaţie alcătuit dintr-un ansamblu de barocamere de punte şi turele presurizabile plasate pe nave suport cu poziţionare dinamică</td></tr>
<tr><td>180</td><td>19</td></tr>
<tr><td>190</td><td>20</td></tr>
<tr><td>200</td><td>21</td></tr>
<tr><td>210</td><td>22</td><td colspan="2" rowspan="5">Scufundare de mare adâncime cu amestecuri HELIOX sau cu amestecuri TRIMIX
Scufundare exclusiv în saturaţie (industrială, militară)</td></tr>
<tr><td>•</td><td>•</td></tr>
<tr><td>•</td><td>•</td></tr>
<tr><td>•</td><td>•</td></tr>
<tr><td>500</td><td>51</td></tr>
</table>

*) *Scufundarea unitară* în sistem turelă–barocameră este folosită pentru scufundări de adâncime. Peste o anumită adâncime, durata utilă a scufundării devine însă foarte mică în raport cu durata palierelor de decompresie. De aceea, în cazul şantierelor subacvatice cu durată mare, la adâncime importantă, se preferă scufundarea în saturaţie.

**) *Scufundarea în saturaţie*, este tot o scufundare de sistem şi constă în presurizarea scafandrilor în barocamere la suprafaţă, în vecinătatea adâncimii corespunzătoare şantierului subacvatic, transportul acestora cu ajutorul unei turele de scufundare presurizată, lucrul în imersiune şi readucerea scafandrilor, sub presiune, în barocamera de la suprafaţă. Se execută o singură decompresie după terminarea lucrărilor, decompresie ce depinde numai de adâncimea la care s-a efectuat scufundarea.

3.2. CLASIFICAREA APARATELOR DE RESPIRAT SUB APĂ

Indiferent de echipamentul utilizat pentru pătrunderea sub apă, scafandrii trebuie să dispună şi de aparate de respirat sub apă, utilizate fie pentru salvare, fie pentru evoluția lor în mediul acvatic în scop de explorare sau de intervenție. Cartea de față se va ocupa numai de aparatele de respirat sub apă şi, legat de acestea, va aborda şi probleme privind mecanica respiratorie, fabricarea amestecurilor respiratorii, expunerea la presiune şi decompresia etc.

Clasificarea aparatelor de respirat sub apă se poate face după mai multe criterii. În tabelul 3.2 se prezintă clasificarea aparatelor de respirat sub apă funcție de o serie de criterii determinante.

Tabelul 3.2

Clasificarea aparatelor de respirat sub apă

Nr. crt.	Criteriul de clasificare	Tipul de aparat de respirat sub apă
1	Modul de asigurare cu amestec respirator (fig. 3.1)	• aparat autonom (fig. 3.1,*a*, 3.2, şi 3.5) • aparat cu alimentare de la suprafață prin ombilical (fig. 3.1,*a*, 3.1,*b*, 3.3 şi3.6) • aparat cu alimentare din mijloace imersate prin ombilical
2	Tipul circuitului realizat de amestecul gazos în aparat (fig. 3.4)	• aparat cu circuit deschis (fig. 3.4,*a*, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 şi 3.9) • aparat cu circuit închis (fig. 3.4,c_1,c_2, 3.10, 3.11 şi 3.12) • aparat cu circuit semiînchis (fig. 3.4,*b*, 3.14, 3.15, 3.16 şi 3.17) • aparat cu circuit mixt (fig. 3.18 şi 3.19)
3	Modul de livrare a debitului de amestec la consumator (fig. 3.1)	• aparat cu debit continuu (fig. 3.1,*b*, 3.5 şi 3.6) • aparat cu debit la cerere (fig. 3.1,*a*, 3.7 şi 3.8)
4	Tipul gazului utilizat	• aparat cu oxigen (fig. 3.10 şi 3.11) • aparat cu amestec respirator*) (fig. 3.12, 3.14, 3.15, 3.16, 3.18 şi 3.19) • aparat cu oxigen şi cu amestec respirator (fig. 3.18 şi 3.19)
5	Tipul amestecului respirator utilizat	• aparat cu amestecuri binare (NITROX, HELIOX) • aparat cu amestecuri ternare (TRIMIX)
6	Modul de fabricare al amestecului respirator	• aparat cu amestecare locală (fig. 3.12, 3.15 şi 3.16) • aparat cu amestec prefabricat (fig. 3.14)

*) Amestecurile respiratorii utilizate pentru aparatele de respirat sub apă pot fi amestecuri binare azot-oxigen (N_2-O_2 = NITROX), heliu-oxigen (He-O_2 = HELIOX) şi amestecuri ternare heliu-azot-oxigen (He-N_2-O_2 = TRIMIX).

În figura 3.1 se prezintă, pe scurt, caracteristicile aparatelor de respirat sub apă clasificate după două dintre criterii şi anume din punct de vedere al modului de asigurare cu amestec respirator şi din punct de vedere al modului de livrare a debitului de amestec la consumator.

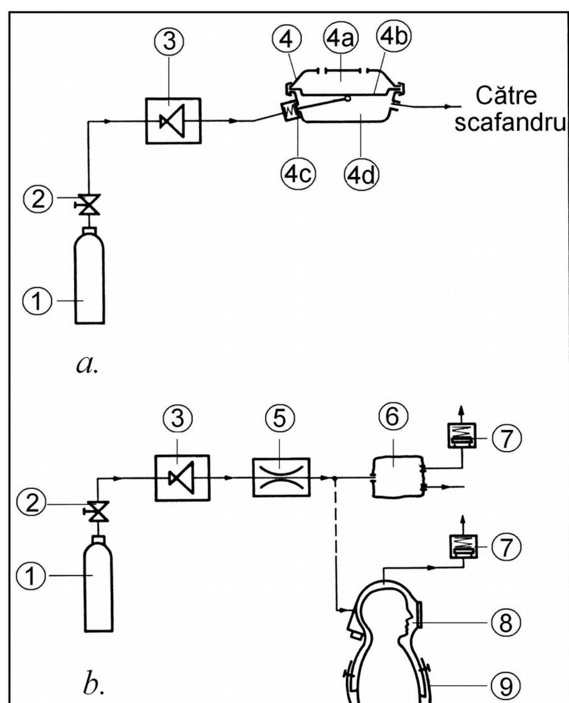


Fig. 3.1. Clasificarea aparatelor de respirat sub apă după modul de livrare a debitului de gaz (amestec gazos) respirator către scafandru:
a – aparat cu debit la cerere;
b – aparat cu debit continuu;
1– butelie de stocaj pentru gazul respirator;
2– robinet de izolare;
3– regulator de presiune treapta I;
4– regulator de presiune treapta a II-a (4a – cameră cu apă, 4b – membrană, 4c – ventil acţionat de membrană, 4d – cameră cu gaz);
5– ajutaj de injecţie la debit masic constant;
6– sac respirator;
7– supapă de evacuare;
8– cască;
9– costum de scafandru.

3.2.1. CLASIFICAREA APARATELOR DE RESPIRAT SUB APĂ DIN PUNCT DE VEDERE AL MODULUI DE ASIGURARE CU AMESTEC RESPIRATOR

Din punct de vedere al modului de asigurare cu amestec respirator se deosebesc: aparatele de respirat sub apă autonome şi cele cu alimentare prin ombilical, direct de la suprafaţă sau din mijloace imersate.

3.2.1.1. Aparate de respirat sub apă autonome

Aparatele de respirat sub apă autonome, sunt aparatele care au în compunere butelii pentru stocarea sub presiune a gazului sau a amestecului gazos respirator necesar unei scufundări. Buteliile de stocaj sunt prevăzute cu instalaţia specifică de distribuţie şi control. Cu astfel de aparate se asigură scafandrului autonomia faţă de suprafaţă pentru o anumită perioadă de timp care se doreşte a fi cât mai mare posibil.

În figura 3.2 se prezintă un scafandru echipat cu un aparat de respirat sub apă autonom, cu circuit deschis şi debit la cerere tip Dräger.

Optimizarea funcţionării unui aparat de respirat sub apă autonom presupune realizarea următoarelor deziderate:

– adâncime de scufundare cât mai mare;
– timp de lucru în imersie, t_e, îndelungat;
– timp de revenire la presiunea atmosferică (timp de decompresie), t_d, cât mai mic.

Dezideratele enumerate mai sus nu sunt compatibile, astfel încât dacă se reuşeşte rezolvarea a două dintre ele, cel de al treilea se opune. În consecinţă, aparatele de respirat sub apă autonome trebuie să admită un compromis între aceste deziderate. După cum se cunoaşte, pentru o anumită adâncime de scufundare, timpul de lucru sub apă t_ℓ şi timpul de decompresie t_d, împreună cu timpul de coborâre a scafandrului la adâncimea de lucru t_c, definesc randamentul scufundării η_s care are expresia $\eta_s = t_\ell/(t_c + t_\ell + t_d)$ şi care se doreşte a fi cât mai ridicat.

3.2.1.2. Aparate de respirat sub apă cu alimentare prin ombilical

Aparatele de respirat sub apă cu alimentare prin ombilical, se caracterizează prin aceea că amestecul respirator este livrat către scafandru prin intermediul unui furtun de alimentare. Aceste aparate se folosesc fie cu alimentare direct de la suprafaţa apei, fie cu alimentare din diferite mijloace imersate, echipamente hiperbare aflate în echipresiune cu mediul acvatic exterior, cum ar fi turele de scufundare presurizabile, barocamere aferente submersibilelor purtătoare de scafandri, case subacvatice şi laboratoare submerse.

În figura 3.3 se prezintă un scafandru echipat cu un aparat de respirat sub apă cu alimentare prin ombilical, de la suprafaţă, tip Dräger.



Fig. 3.2. Scafandru echipat cu un aparat de respirat sub apă autonom, cu circuit deschis şi debit la cerere, tip Dräger.



Fig. 3.3. Scafandru echipat cu un aparat de respirat sub apă cu alimentare prin ombilical, de la suprafaţă, tip Dräger.

3.2.2. CLASIFICAREA APARATELOR DE RESPIRAT SUB APĂ DIN PUNCT DE VEDERE AL CIRCUITULUI REALIZAT DE AMESTECUL RESPIRATOR ÎN CADRUL APARATULUI

Din punct de vedere al circuitului realizat de amestecul respirator în cadrul aparatului, în procesul respirației, aparatele de respirat sub apă pot fi împărțite în patru categorii principale şi anume: cu circuit deschis, închis, semiînchis (fig. 3.4) şi mixt.

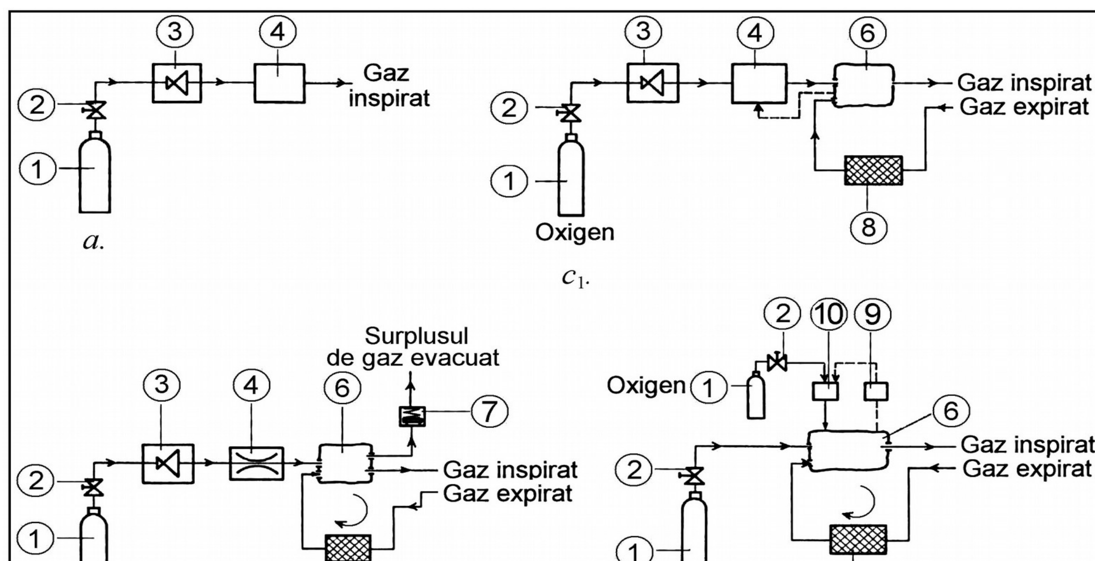


Fig. 3.4. Clasificarea aparatelor de respirat sub apă după tipul circuitului realizat de gazul (amestecul de gaze) respirator în aparat:
a – aparat cu circuit deschis; *b* – aparat cu circuit semiînchis; c_1 – aparat cu circuit închis cu oxigen; c_2 – aparat cu circuit închis cu amestec de gaze;
1– butelie de stocaj pentru gazul (amestecul de gaze) respirator; 2– robinet de izolare; 3– regulator de presiune treapta I; 4– regulator de presiune treapta a II-a; 5– ajutaj de injecție la debit masic constant; 6– sac respirator; 7– supapă de evacuare; 8– cartuş epurator (absorber CO_2); 9– traductor de presiune parțială a oxigenului; 10– dispozitiv de injecție pentru oxigen.

3.2.2.1. Aparate de respirat sub apă cu circuit deschis

Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis (fig. 3.4,*a*), sunt aparatele la care întregul amestec gazos, rezultat din expirație, este evacuat în mediul acvatic exterior. Aceste aparate sunt alcătuite din buteliile de stocaj pentru rezerva de gaz sau de amestec gazos respirator înmagazinate sub presiune, atunci când aparatele sunt autonome, şi dintr-un regulator de presiune care asigură respirația la o presiune egală cu presiunea corespunzătoare adâncimii de imersie. Autonomia acestor aparate este relativ redusă. Atunci când se doreşte ca timpul de imersie să fie mai mare, se utilizează aparate de respirat sub apă cu circuit deschis alimentate cu aer sau cu amestec gazos sintetic de la suprafață sau dintr-un mijloc imersat. Adâncimea de scufundare cu aparatele în circuit deschis este relativ mare, până la 50…75 m. Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis sunt la rândul lor de două feluri:

– aparate cu circuit deschis, *cu debit continuu* (fig. 3.5 şi fig. 3.6);
– aparate cu circuit deschis, *cu debit la cerere* (fig. 3.7 şi fig. 3.8).



Fig. 3.5. Scafandru greu echipat cu aparat de respirat sub apă, cu circuit deschis, cu debit continuu, DM 200.

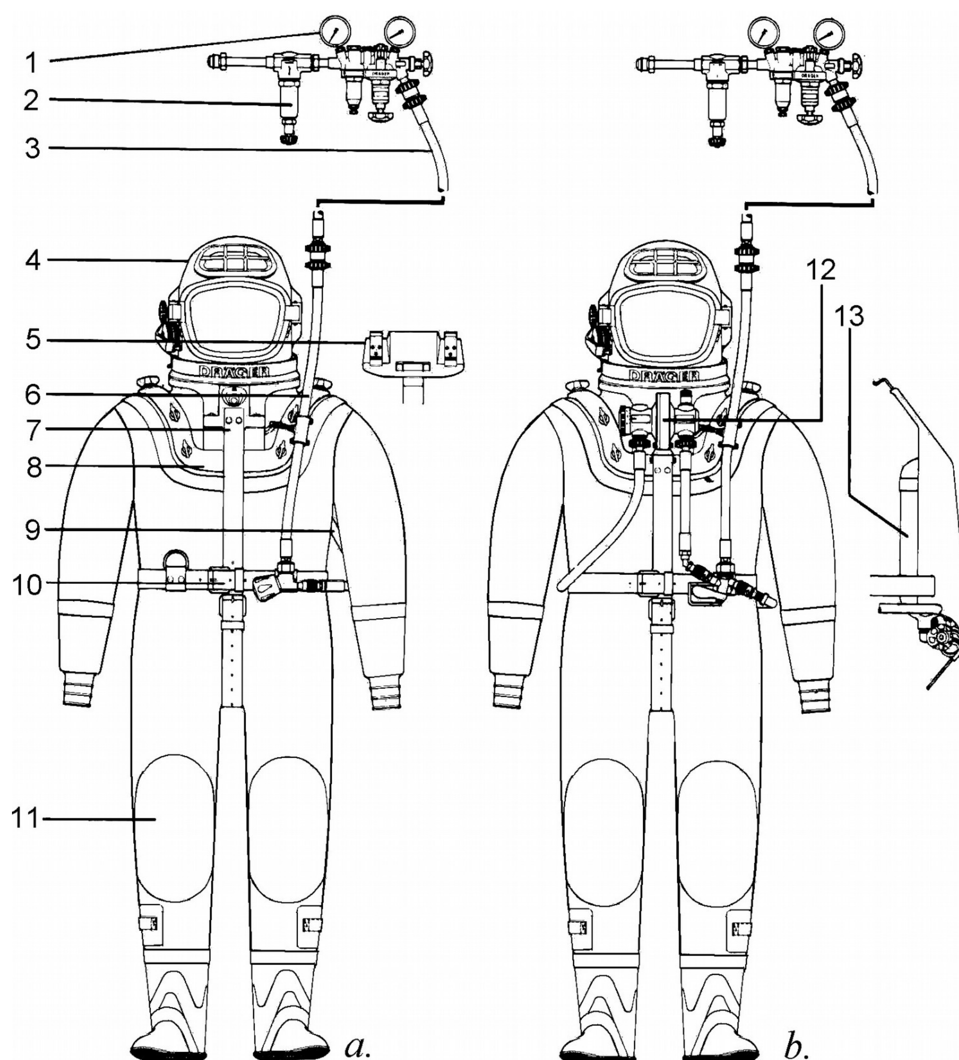


Fig. 3.6. Schemele aparatelor de respirat sub apă pentru scafandru greu, DM 200; *a.* Aparatul DM 200/1; *b.* Aparatul DM 200/2:
1– reductor presiune treapta a II-a; 2– filtru din metal sinterizat; 3– furtun de alimentare; 4– cască rigida; 5– lest de spate; 6– furtun de legătură; 7– lest de piept; 8– guler; 9– furtun de legătură la cască; 10– centură cu robinet cu control manual; 11– costum pentru scafandru greu; 12– dispozitiv automat de control a scufundării; 13– rezervă pentru alimentare cu aer.



Fig. 3.7. Scafandri echipați cu aparate de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit la cerere şi cu alimentare de la suprafață PL 70.

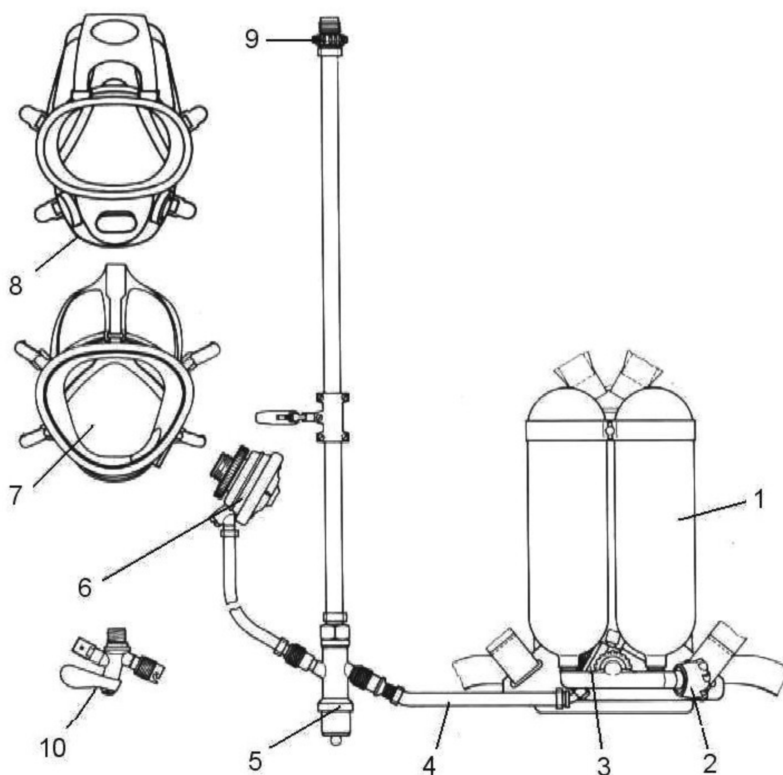


Fig. 3.8. Schema aparatului de respirat sub apă cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafață, PL 70:
1– bloc butelii securitate; 2– robinet butelie; 3– detentor treapta I; 4– furtun de medie presiune; 5- robinet de comutare automată; 6- detentor treapta a Ii-a; 7– mască facială; 8– mască facială pentru cagula costumului cu volum constant; 9– conector furtun alimentare de la suprafață; 10– robinet de comutare manuală.

În figura 3.9 se prezintă schematic caracteristicile şi performanțele aparatelor de respirat sub apă cu circuit deschis.

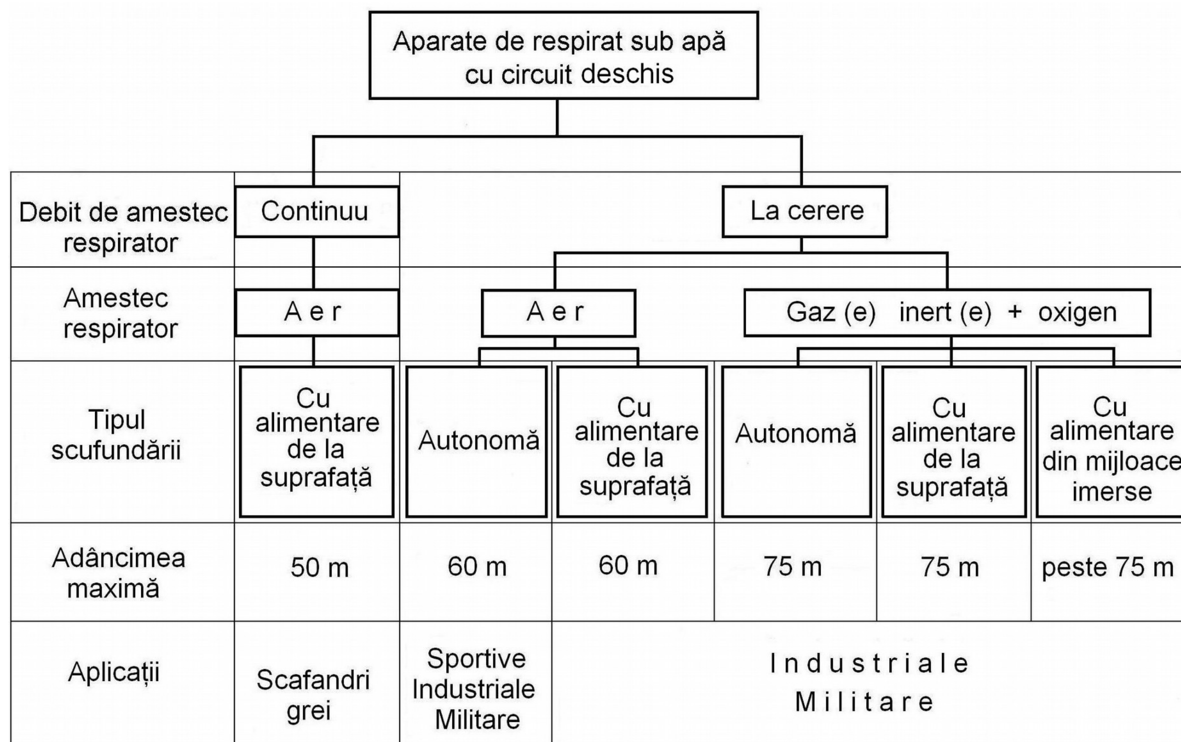


Fig. 3.9. Schema generală cu caracteristicile, performanțele şi domeniile de aplicare pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis.

3.2.2.2. Aparate de respirat sub apă cu circuit închis

Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis, (fig. 3.4,c_1,c_2), sunt aparatele, la care întregul amestec gazos rezultat prin expirație este recirculat, o parte din amestec (dioxidul de carbon) fiind reținută în cartuşul epurator (absorberul de CO_2) aferent aparatului, cealaltă parte fiind reciclată. Aceste aparate sunt autonome şi sunt alcătuite din butelia de stocaj cu oxigen sau cu amestec gazos respirator, dintr-un reductor de presiune treapta I, care reduce presiunea oxigenului sau amestecului respirator de la presiunea înaltă din butelie la o presiune medie şi dintr-un sac respirator funcționând ca un reductor treapta a II-a ce permite reducerea presiunii de la valoarea medie la o valoare corespunzătoare adâncimii de imersie. Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis pot livra oxigenul sau amestecul respirator fie continuu, fie la cerere. Atunci când aceste aparate utilizează amestec respirator, acesta poate fi realizat prin amestecare locală sau poate fi prefabricat. Autonomia acestor aparate este foarte ridicată. Adâncimea maximă teoretică de lucru la aparatele cu circuit închis este de 6,5 m pentru aparatele cu oxigen (pentru scufundări cu oxigen cu durată relativ scurtă, adâncimea de scufundare poate creşte până la 10 m şi chiar mai mult pentru incursiuni cu durată foarte mică) şi mai mare pentru aparatele cu amestec. Prin urmare, aparatele de respirat sub apă cu circuit închis pot fi de două feluri:

– aparate cu circuit închis, *cu oxigen* (fig. 3.10 şi fig. 3.11);
– aparate cu circuit închis, *cu amestec* (fig. 3.12).



Fig. 3.10. Aparatul de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen, LAR VI, Dräger.

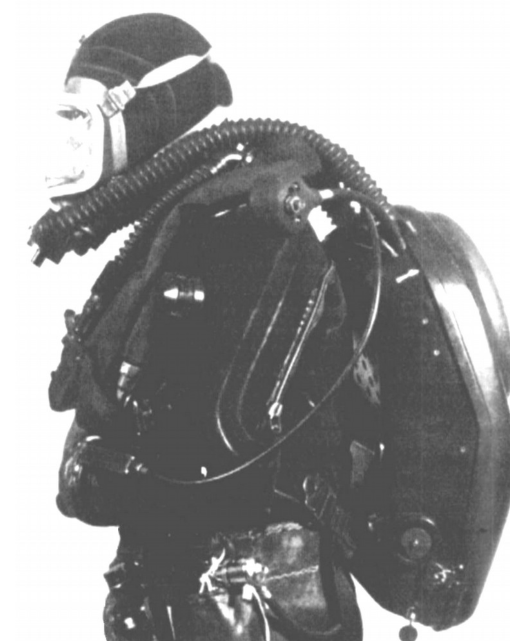


Fig. 3.12. Scafandru militar echipat cu aparat de respirat sub apă, cu amestec, în circuit închis, MK 15, Dräger.

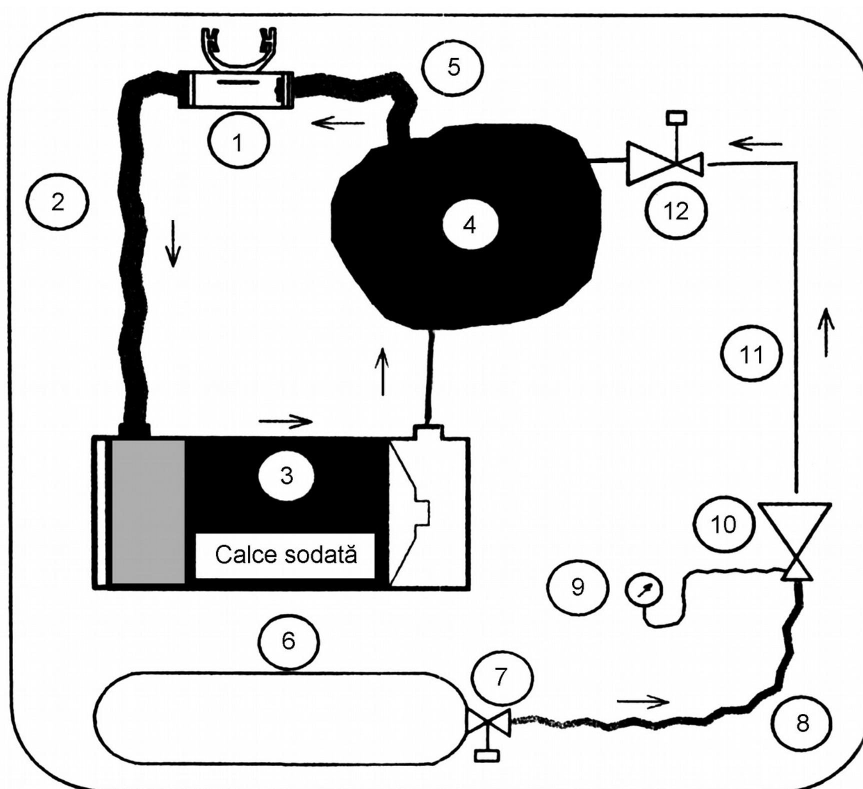


Fig. 3.11. Schema circuitului de gaz pentru aparatul cu oxigen, în circuit închis, LAR VI:
1– piesă bucală cu muştiuc; 2– furtun de expirație; 3– cartuş epurator pentru CO_2; 4– sac respirator; 5– furtun de inspirație; 6– butelie cu oxigen; 7– robinet butelie; 8– linia de înaltă presiune; 9– manometru de înaltă presiune; 10– reductor de presiune (detentor treapta I); 11– linia de medie presiune; 12– valvă cu deschidere la cerere (detentor treapta a Ii-a).

În figura 3.13 se prezintă o schemă generală cu caracteristicile şi performanţele aparatelor de respirat sub apă cu circuit închis.

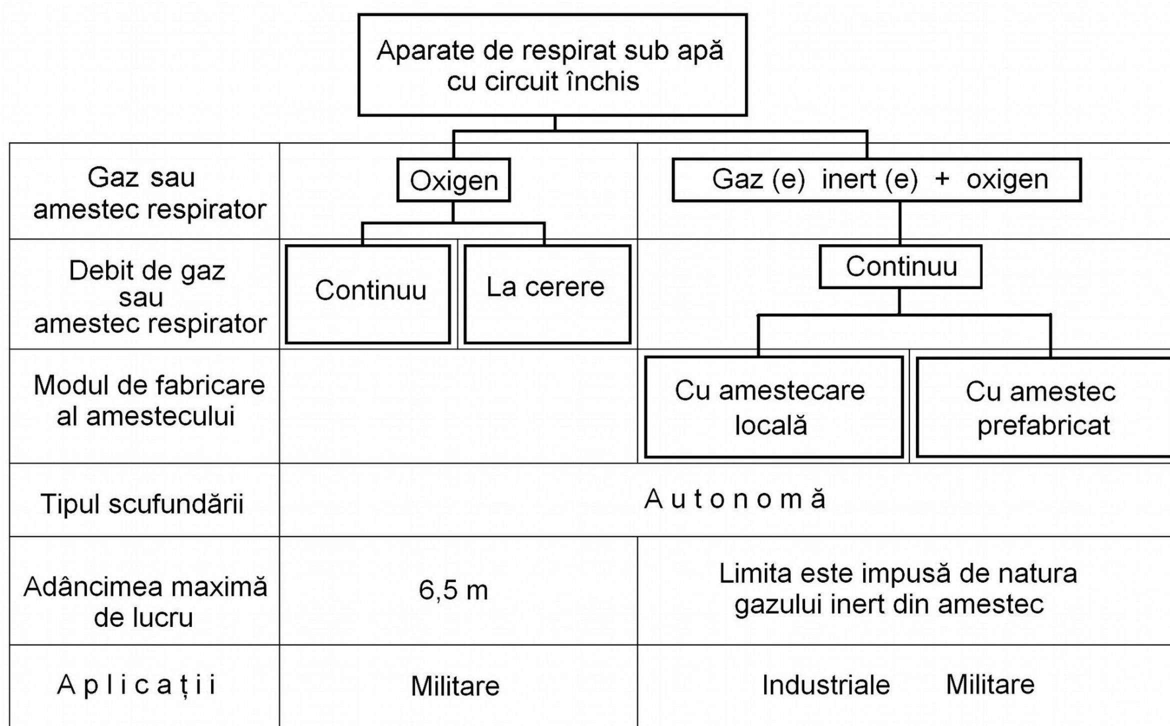


Fig. 3.13. Schema generală cu caracteristicile, performanţele şi domeniile de aplicaţie pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit închis.

3.2.2.3. Aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis

Aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis (fig. 3.4,*b*), sunt aparatele la care o parte din amestecul gazos expirat este evacuat în mediul acvatic exterior, cealaltă parte fiind reciclată şi reintrodusă în circuitul de respiraţie după ce a fost trecută printr-un cartuş epurator unde a fost reţinut dioxidul de carbon. Aceste aparate sunt alcătuite din butelii de stocaj cu amestecuri binare azot–oxigen (NITROX) sau heliu–oxigen (HELIOX), sau cu amestecuri ternare TRIMIX, ($He–N_2–O_2$ sau $Ne–N_2–O_2$), regulator de presiune treapta I, sac respirator şi sistem de livrare automată a debitului de amestec respirator către consumator. Aceste aparate, atunci când sunt autonome, sunt caracterizate printr-o autonomie ridicată şi printr-un randament al scufundării crescut. Atunci când se doreşte un timp de scufundare mai ridicat, se procedează la alimentarea cu amestec respirator sintetic de la suprafaţă sau dintr-un mijloc imersat, realizându-se prin aparatul cu circuit semiînchis o economie de amestec respirator. Adâncimea maximă de scufundare cu astfel de aparate este de 54 m în cazul utilizării amestecurilor NITROX şi peste 54 m în cazul utilizării amestecurilor HELIOX sau TRIMIX.

Funcţie de modul de preparare a amestecului respirator, aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis pot fi:

– aparate cu circuit semiînchis, *cu amestec prefabricat* (fig. 3.14);

– aparate cu circuit semiînchis, *cu amestec preparat local* (fig. 3.15 şi 3.16).



Fig. 3.14. aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, ATLANTIS I, Dräger.



Fig. 3.15. Scafandru militar echipat cu aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, SMT, Dräger.

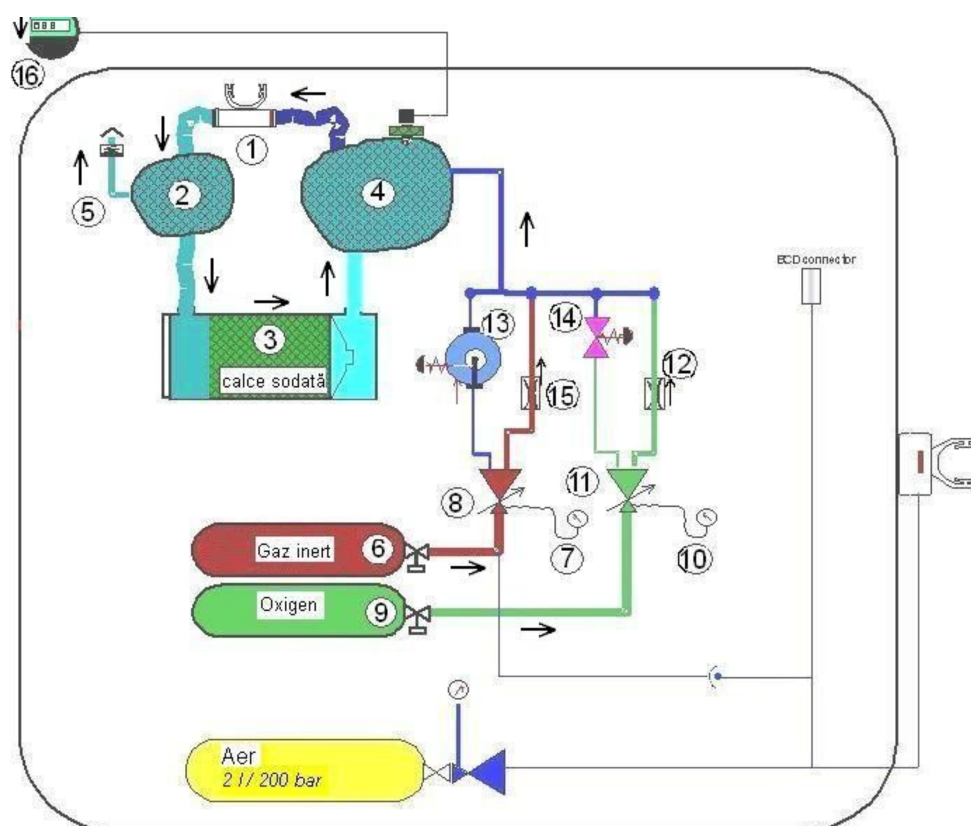
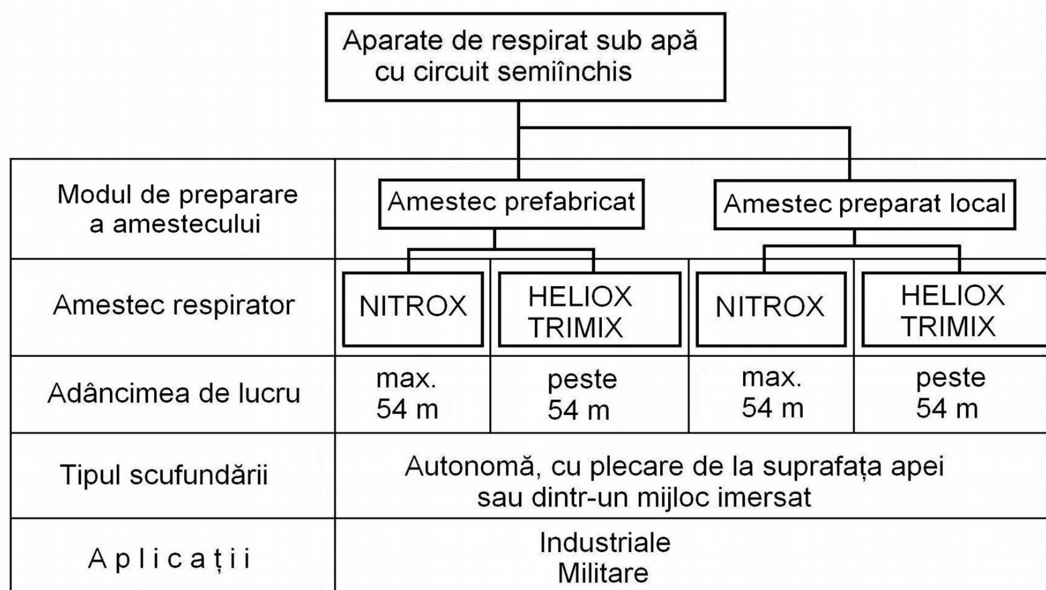


Fig. 3.16. Schema de principiu a aparatului SMT:
1– piesă bucală cu muştiuc; 2– sac de expirație; 3– cartuş epurator pentru CO_2; 4– sac de inspirație; 5– supapă de evacuare; 6– butelie gaz inert; 7– manometru butelie gaz inert; 8– reductor de presiune pe gaz inert; 9– butelie oxigen; 10– manometru butelie oxigen; 11– reductor de presiune pe oxigen; 12, 13, 14, 15– dispozitiv de injecție, completare şi corectare; 16– indicator de oxigen

În figura 3.17 este prezentată o schemă conținând caracteristicile generale şi performanțele aparatelor de respirat sub apă cu circuit semiînchis.



NITROX = amestec binar azot–oxigen (N_2–O_2);
HELIOX = amestec binar heliu–oxigen (He–O_2);
TRIMIX = amestec ternar heliu–azot–oxigen (He–N_2–O_2).

Fig. 3.17. Schema generală cu caractersiticile, performanțele şi domeniile de aplicație pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis.

3.2.2.4. Aparate de respirat sub apă cu circuit mixt

Aparatele de respirat sub apă cu circuit mixt, sunt aparatele care funcționează, de regulă, în circuit închis cu oxigen până la adâncimea de 6,5 m (şi chiar până la adâncimi de 15…20 m pentru incursiuni de scurtă durată) şi în circuit deschis sau semiînchis, cu amestec respirator gazos, peste aceste adâncimi, fără a depăşi adâncimea de 54 m pentru NITROX. Aceste aparate au în componență elementele caracteristice ale aparatelor cu circuit închis, deschis sau semiînchis, combinând totodată avantajele acestor aparate. Scopul principal al realizării unor astfel de aparate îl reprezintă obținerea unui randament al scufundării η_s foarte ridicat prin reducerea la maxim a timpului de decompresie, t_d .

În figurile 3.18 şi 3.19 este prezentat aparatul de respirat sub apă cu circuit mixt LAR VII Combi fabricat de firma DRÄGER.

Aparatele de respirat sub apă a căror clasificare a fost prezentată mai sus sunt astfel concepute încât să poată fi utilizate cu precădere pentru anumite domenii. Astfel, alegerea unui tip sau altul de aparat de respirat sub apă se va face funcție de caracteristicile scufundării (adâncime, timp de expunere la presiune, temperatura apei), de nivelul de efort al scafandrului în timpul activității subacvatice, de autonomia necesară, de randamentul scufundării, precum şi de sensibilitatea şi gradul de antrenament ale scafandrului.

Ținând cont de tipul de calificare al scafandrului, se poate arăta faptul că, în timp ce aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis, autonome şi cu debit de aer la cerere pot fi utilizate de către toate categoriile de scafandri, celelalte categorii de aparate sunt interzise amatorilor, ele fiind destinate numai scafandrilor profesionişti. Dar, chiar şi din rândul profesioniştilor, cei care desfăşoară activități cu caracter civil nu pot utiliza aparate de respirat sub apă cu oxigen sau cu amestecuri supraoxigenate, acestea fiind destinate numai scafandrilor militari, adică scafandrilor de luptă şi respectiv, scafandrilor deminori, selecționați în urma unor teste speciale aşa cum este *testul oxigenului* şi beneficiind de antrenamente riguroase.



Fig. 3.18. Scafandru militar echipat cu aparat de respirat sub apă cu circuit mixt, LAR VII Combi, Dräger.

În raport cu aparatele de respirat sub apă în circuit deschis, a căror utilizare comportă un nivel ridicat de securitate, celelalte aparate comportă diferite niveluri de risc în raport cu diferitele tipuri de accidente (hipoxie, hiperoxie, intoxicație cu CO_2). Astfel, în tabelul 3.3 sunt prezentate nivelurile de risc pentru diferite tipuri de aparate de respirat sub apă, la diferitele tipuri de accidente de scufundare; punctajul având următoarea semnificație:

1 – risc minim, datorat unor erori grosolane;
2 – risc moderat;
3 – risc considerabil, dar previzibil;
4 – risc maximal (acceptabil ca risc calculat);
5 – risc inacceptabil.

Apare evident riscul mai mare la utilizarea aparatelor de respirat sub apă în circuit închis cu oxigen. Toate aceste riscuri sunt riscuri calculate care pot fi diminuate considerabil prin elaborarea unor instrucțiuni de utilizare adecvate şi printr-un antrenament foarte serios al scafandrilor.

Nivelurile de risc considerabile sunt motivele pentru care aparatele de respirat sub apă în circuit semiînchis şi închis sunt aparate speciale, ce pot fi utilizate numai de scafandrii profesionişti şi mai ales de scafandrii militari.

Pentru o mai bună înțelegere a funcționării aparatelor de respirat sub apă, a performanțelor acestora, precum şi a necesității utilizării lor, este necesar să se îndrepte atenția asupra sistemului pe care îl formează omul împreună cu aparatul. La domeniul pătrunderii omului sub apă interesează, mai mult decât în orice alt domeniu, interacțiunile dintre mediul acvatic şi sistemul om-aparat, dintre mediul acvatic şi

fiecare subsistem (om şi aparat) precum şi interacţiunea între elementele subsistemului (între om şi aparat), precum şi corelarea acestora în condiţiile regimului hiperbar.

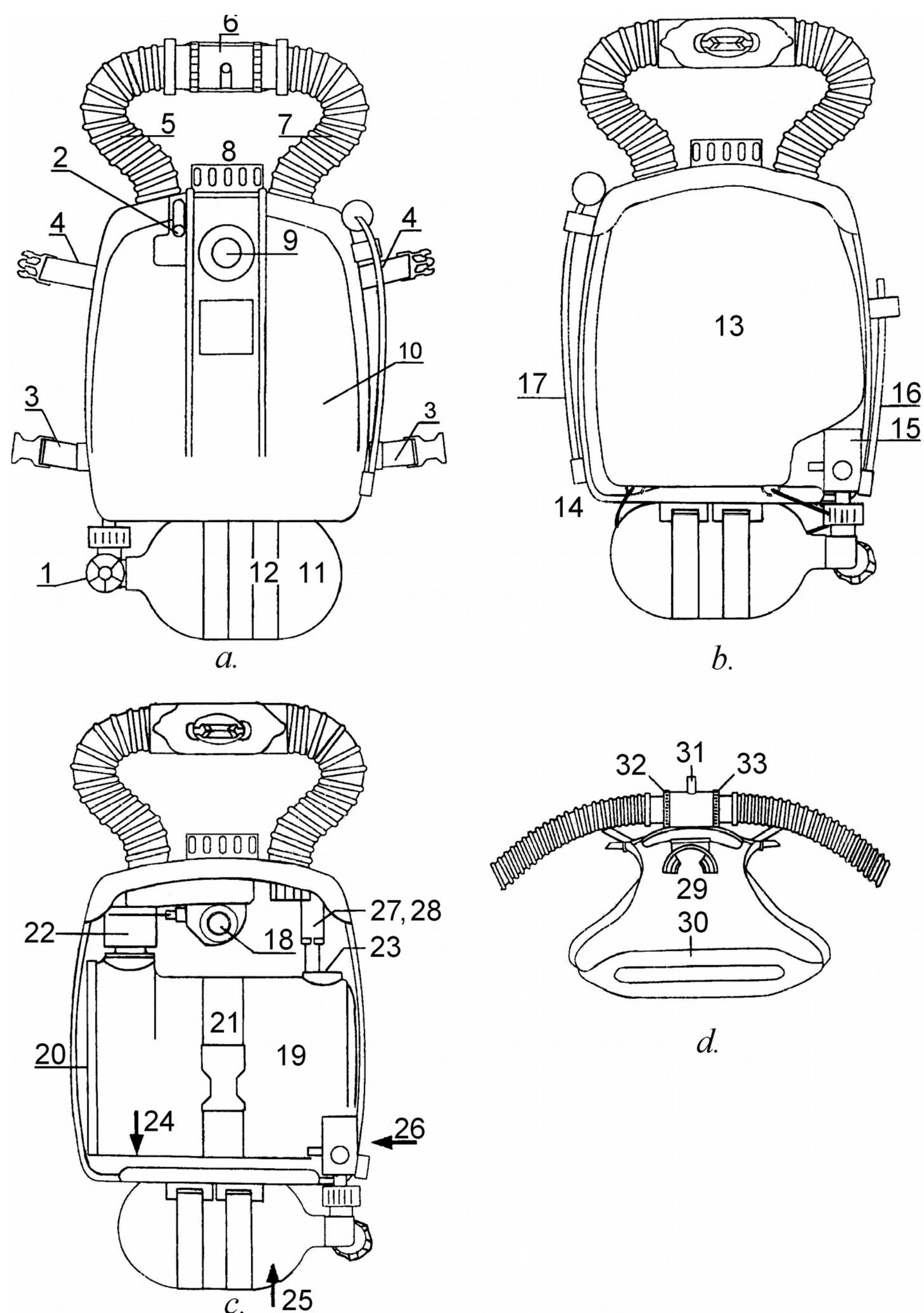


Fig. 3.19. Schema aparatului LAR VII Combi cu elementele componente principale:

a. Vedere frontală: 1– robinetul buteliei de oxigen; 2– comutator manual; 3– catarame inferioare pentru hamuri; 4– catarame superioare pentru hamuri; 5– furtun de inspiraţie; 6– robinet rotativ manual; 7– furtun de expiraţie; 8– supapă de evacuare la suprapresiune; 9– valvă de by-pass; 10– carcasă; 11– butelie cu oxigen; 12– curele prindere butelie;

b. Partea din spate cu sacul respirator: 13– sacul respirator; 14– cablu din cauciuc; 15– reductor de presiune pentru oxigen; 16– conductă racord la butelia cu amestec; 17– manometru pentru presiunea din butelie;

c. Partea din spate fără sacul respirator: 18– automat pulmonar; 19– cartuş epurator pentru CO_2; 20– capac; 21– curea de susţinere; 22– distribuitor; 23– racord pentru sacul respirator;

24– plăcuță identificare aparat; 25– plăcuță identificare butelie; 26– plăcuță identificare reductor de presiune; 27– bloc comutare; 28– unitate de dozare;
d. Piesa bucală: 29– muştiuc; 30– bandă pentru cap; 31– manetă robinet rotativ; 32– supapă de expirație; 33– supapă de inspirație.

De aceea, înainte de prezentarea propriu–zisă, în detaliu, a aparatelor de respirat sub apă, se va face o scurtă trecere în revistă a subsistemului pe care îl reprezintă omul, cu funcțiile sale implicate în mod direct şi a căror mecanisme fiziologice nu trebuie, în nici un caz, alterate de aparatele de respirat.

Tabelul 3.3

Nivelurile de risc pentru aparatele de respirat sub apă în raport cu diferite tipuri de accidente

Aparate de respirat sub apă		Nivelurile de risc pentru accidente		
		Hipoxie	Hiperoxie	Intoxicație cu CO_2
În circuit deschis	- cu debit continuu	1	1	1
	- cu debit la cerere	1	1	1
În circuit semiînchis, autonome	- cu debit masic contant de amestec	3	2	2
	- cu debit masic constant de oxigen	5	3	2
În circuit semiînchis, cu alimentare de la suprafață	- cu debit masic constant de amestec	4	2	2
	- cu debit masic constant de oxigen	4	3	2
În circuit închis, cu oxigen	- cu debit la cerere	2	4-5	2
	- cu injecție constantă	3	4-5	2
	- cu injecție manuală intermitentă	4	4-5	2
În circuit închis, cu amestec	- cu senzori electrochimici de O_2	3	2	2
	- cu debit volumic constant	5	3	2

4.

GAZE ŞI AMESTECURI DE GAZE UTILIZATE ÎN SCUFUNDARE

Un rol important în conceperea, proiectarea, realizarea şi exploatarea aparatelor de respirat sub apă îl au gazele şi amestecurile de gaze respiratorii utilizate în cadrul acestor aparate. Tipul gazului sau amestecului respirator utilizat este impus de tipul aparatului de scufundare folosit şi de tehnologia de scufundare adoptată.

Pentru alegerea corectă a gazului sau amestecului respirator în cadrul diferitelor aparate de respirat sub apă şi pentru stabilirea cu precizie a tehnologiei de scufundare, este necesară cunoaşterea în detaliu a caracteristicilor fizice ale gazelor utilizate. De asemenea, pentru obţinerea unor amestecuri de gaze cu participaţii volumice (concentraţii) ale componentelor dorite, este necesară cunoaşterea metodelor de fabricare a acestor amestecuri respiratorii.

4.1. GENERALITĂŢI PRIVIND GAZELE UTILIZATE ÎN SCUFUNDARE

Primul gaz utilizat în scufundare a fost *aerul* care este un amestec respirator natural. Folosit la adâncimi mari aerul pune probleme importante cu implicaţii în revenirea scafandrului la presiunea atmosferică, impunând precauţii severe pentru evitarea unor accidente datorate fie apariţiei unor stări anormale, fie unei decompresii necorespunzătoare.

Pentru evitarea acestor probleme, cunoscut fiind faptul că oxigenul este gazul indispensabil vieţii şi considerându-se că este "inofensiv", s-a încercat executarea de scufundări numai cu oxigen pur. Din păcate, utilizarea oxigenului pur deşi a eliminat accidentele de decompresie, a condus, în cazul scufundărilor la adâncimi mai mari de 7...10 m, la alte accidente specifice oxigenului. Aceste accidente au fost foarte grave şi uneori mortale, prin acestea infirmându-se "inofensivitatea" oxigenului respirat la presiuni mai mari decât presiunea atmosferică. Astfel, a reapărut necesitatea diluării oxigenului şi realizării unor amestecuri respiratorii sintetice. De asemenea a apărut şi necesitatea găsirii unor noi gaze zise "inerte" pentru eliminarea neajunsurilor provocate de azotul din aerul atmosferic. Considerate ca inerte, pentru că nu sunt nici metabolizate, nici produse de organism, ele sunt totuşi generatoare de efecte biochimice cu atât mai evidente cu cât presiunea parţială a gazului inert, din amestecul gazos respirator, creşte o dată cu creşterea adâncimii de scufundare.

Indiferent de gazul inert utilizat ca diluant al oxigenului, unul din marile neajunsuri ale gazului inert este efectul narcotic pe care îl induce. În prezent, se admite că acţiunea fiziologică a unui amestec gazos respirator depinde de compoziţia sa, de

concentrațiile (participațiile volumice) ale gazelor care alcătuiesc amestecul, precum şi de presiunea la care este respirat. Ultimii doi factori, corelați cu acțiunea fiziologică a amestecului respirator, determină valoarea maximă admisă a presiunii parțiale a gazului inert astfel încât efectul narcotic să nu-şi facă apariția.

Este deci important să se cunoască faptul că toate gazele zise "inerte" au o putere narcotică apropiată de aceea a gazelor anestezice (cum ar fi protoxidul de azot), că această putere narcotică este funcție de solubilitatea lor în grăsimi raportată la solubilitatea lor în apă (coeficientul Mayer-Overton) şi funcție, de asemenea, de masa lor specifică (densitatea), ceea ce este evident pentru gazele grele. Astfel, narcoza începe de la adâncimea de 60 m cu azot, de la 40 m cu argon şi chiar la presiunea atmosferică cu xenon, pentru amestecuri cu 80% gaz inert. Din contră, deşi este cel mai uşor gaz dintre gazele utilizate ca diluant pentru oxigen, hidrogenul este mai narcotic ca heliul care este de două ori mai greu, motiv pentru care hidrogenul se distinge de celelalte gaze prin proprietățile sale originale. Heliul poate fi considerat deci ca cel mai inert dintre gaze, dar puterea sa narcotică, cunoscută ca foarte slabă, este perfect perceptibilă la adâncimi foarte mari.

În tabelul 4.1 sunt prezentate câteva proprietăți ale gazelor zise "inerte", legate de puterea lor narcotică.

Tabelul 4.1

Câteva proprietăți ale gazelor zise "inerte"

Gaz	Masa molară [kg/kmol]	Densitatea [kg/m^3]*	Numărul Van der Waals** *a*	Solubilitatea [$m\ell/\ell$] în apă (la 37^0C)	Solubilitatea [$m\ell/\ell$] în grăsimi (la 37^0C)	M.O.***
Heliu	4	0,18	0,034	9,2	17	1,85
Neon	20	0,90	0,21	10,6	22	2,07
Hidrogen	2	0,09	0,24	18,0	57	3,17
Azot	28	1,25	1,39	14,5	76	5,24
Argon	40	1,78	1,34	33,0	150	4,54
Kripton	83,8	3,75	2,32	70,0	490	7,00
Xenon	131	5,90	4,19	130,0	1700	13,07

*Valorile densităților sunt la 0^0C şi la presiunea atmosferică normală;

**Numărul lui Van der Waals *a* exprimă forța de atracție intermoleculară;

***Coeficientul Mayer-Overton = $\frac{\text{Solubilitatea în grăsimi}}{\text{Solubilitatea în apă}}$, în relație cu puterea narcotică.

Un alt neajuns, la fel de important, îl constituie faptul că la decompresie, gazul inert se poate degaja cu formarea de bule, care pot provoca accidente serioase în cazul nerespectării unei proceduri speciale de revenire la presiunea atmosferică. În plus, absența prelungită a azotului din amestecurile respiratorii poate sta la baza unor importante modificări de ordin fiziologic, iar în perioada schimbării amestecurilor respiratorii apare, la nivelul membranelor, o contradifuzie izobarică a gazelor inerte dizolvate în țesuturi.

4.2. PREZENTAREA GAZELOR UTILIZATE ÎN SCUFUNDARE

Gazele utilizate în scufundare sunt în primul rând oxigenul şi, în al doilea rând, gazele diluante pentru oxigen (azotul, heliul, hidrogenul, neonul etc.).

4.2.1. OXIGENUL

Oxigenul este cel mai important dintre toate gazele utilizate în scufundare deoarece este indispensabil vieții şi este elementul chimic cel mai răspândit din natură. Aerul atmosferic conține aproximativ 21% oxigen liber, în stare moleculară. Acest gaz, inodor, incolor şi insipid este foarte activ combinându-se uşor cu alte elemente. În tabelul 4.2 sunt prezentate cele mai importante caracteristici fizice ale oxigenului.

În scufundare, pentru prima dată a fost utilizat oxigenul pur, în cel de-al doilea război mondial, de către scafandrii de luptă italieni. Aceştia, echipați cu combinezoane grele, etanşe şi cu aparate de respirat sub apă în circuit închis, au efectuat intervenții sub apă cu scop militar. Nu cunoşteau nimic despre toxicitatea oxigenului, motiv pentru care au avut pierderi chiar pe timpul antrenamentelor.

Tabelul 4.2

Proprietățile fizice ale oxigenului

Mărimea	Valoarea	Mărimea	Valoarea
Volumul molar $[m^3/kmol]$	22,403	$k/\mu c_v$	1,93
Masa molară $[kg/kmol]$	31,999	$D\rho/\mu$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Temperatura critică T_{cr} [K]	154,4	Constante Van der Waals: a – $at/(\ell/mol)^2$; b – ℓ/mol	1,36; 0,0318
Temperatura de fierbere la 1,013 bar (sc.abs.) T_f [K]	90,2	Presiunea critică p_{cr} [ata] **	49,7
Conductibilitatea termică k [$\mu cal/cm \cdot s \cdot K$]	58,5	T_f/T_{cr}	0,58
Coeficientul de autodifuzie $D[cm^2/s]$	0,189	Diametrul moleculei [Å]***	3,62
Densitatea $\rho[g/\ell]$	1,429	Solubilitatea în apă $[\ell/\ell]$	0,0314
Coeficientul dinamic de viscozitate μ[micropoise] *	192,6	Solubilitatea în alcool etilic $[\ell/\ell]$	0,1431
Căldura specifică masică la volum constant c_v[cal/gK]	0,157	Solubilitatea în benzen $[\ell/\ell]$	0,163

*1 micropoise = 10^{-3} poise = 10^{-3} g/(cm s) = dyn s/cm^2;
**ata – atmosferă în scara absolută;
***Å – angström (1 Å = 10^{-8} cm).

În prezent, când fenomenele de toxicitate ale oxigenului sunt cunoscute şi controlate, oxigenul este utilizat, la aparatele de respirat sub apă, atât pur cât şi amestecat cu gaze inerte sub formă de amestecuri respiratorii. Pentru dozarea corespunzătoare a oxigenului pur sau a amestecului respirator către scafandru, este necesară cunoaşterea consumului individual de oxigen funcție de activitatea subacvatică desfăşurată de scafandru (tab. 4.3).

Tabelul 4.3

Consumul individual de oxigen funcție de activitatea subacvatică desfăşurată de scafandru (NOAA Diving Manual)

Activitatea desfăşurată de scafandru	Consum O_2 [ℓ_N/min]	Ventilație pulmonară [ℓ_N/min]
Repaus	0,4	8
Lucrări uşoare, înot cu viteza $v = 0{,}5$ Nd* $= 0{,}257$ m/s	0,8	18
Lucrări moderate, înot cu viteza $v = 0{,}8$ Nd $= 0{,}411$ m/s	1,3	30
Lucrări intense, înot cu viteza $v = 1{,}0$ Nd $= 0{,}514$ m/s	1,7	40
Lucrări foarte grele, înot cu viteza $v = 1{,}2$ Nd $= 0{,}617$ m/s	2,5	60

*Nd – nod, unitate de măsură a vitezei egală cu 1 milă marină pe oră: 1 Nd = 1,852 km/h = 0,514 m/s.

În cazul scufundărilor cu alimentare la narghilea şi a scufundărilor autonome cu plecare de la suprafață, în cadrul aparatelor de respirat sub apă, se utilizează de obicei amestecuri gazoase binare supraoxigenate. Utilizarea amestecurilor respiratorii cu concentrații mari de oxigen (cu participații volumice ale oxigenului, r_{O_2}, mari) se justifică prin aceea că viteza de revenire la presiunea atmosferică, deci viteza de decompresie, este dictată de timpul necesar eliminării gazului inert dizolvat la un moment dat în organismul uman. Cantitatea de gaz inert dizolvată este funcție de presiunea parțială a acestuia din amestecul respirator, cu alte cuvinte, pentru o adâncime dată, cu cât participația volumică a oxigenului în amestecul respirator, r_{O_2}, este mai mare, cu atât cantitatea de gaz inert ce se va dizolva în țesuturi va fi mai mică şi implicit viteza de revenire la presiunea atmosferică va fi mai mare.

Astfel, pentru o anumită adâncime de scufundare, care corespunde unei presiuni totale a amestecului gazos respirator, p_{am}, şi pentru un amestec de gaz azot-oxigen (NITROX) caracterizat prin participațiile volumice ale componentelor r_{O_2} şi r_{N_2}, ($r_{O_2} + r_{N_2} = 1$), presiunile parțiale ale celor două componente ale amestecului sunt $p_{O_2} = r_{O_2}\, p_{am}$ şi respectiv $p_{N_2} = r_{N_2}\, p_{am}$, ($p_{O_2} + p_{N_2} = p_{am}$). Este evident faptul că, pentru reducerea timpului de decompresie, este necesară reducerea presiunii parțiale a gazului inert (azotului) din amestec, p_{N_2} şi deci creşterea corespunzătoare a presiunii parțiale a oxigenului din amestec, p_{O_2}. Pentru un p_{am} dat, creşterea presiunii parțiale p_{O_2}

conduce la necesitatea utilizării unui amestec gazos azot-oxigen cu o participație volumică a oxigenului din amestec, r_{O_2}, ridicată, deci a unui amestec NITROX supraoxigenat (cu o valoare a participației volumice a oxigenului, r_{O_2}, mai mare ca 0,21, valoare corespunzătoare aerului). Aceleaşi considerații sunt valabile şi pentru amestecurile gazoase binare heliu-oxigen (HELIOX).

Creşterea participației volumice a oxigenului, r_{O_2}, în amestecul respirator, pentru o anumită adâncime de scufundare şi deci pentru o anumită valoare a presiunii totale a amestecului gazos p_{am}, este limitată de creşterea peste o anumită valoare a presiunii parțiale a oxigenului din amestec, p_{O_2}, dincolo de care pot apărea fenomenele de hiperoxie.

Spre exemplu, pentru o scufundare de o oră la 90 m adâncime de lucru (p_{am} =10 bar (sc. abs.)), dacă amestecul HELIOX respirat pe timpul lucrului conține 2% oxigen (r_{O_2} = 0,02 şi deci $p_{O_2} = r_{O_2}\, p_{am}$ =0,02·10 = 0,2 bar (sc. abs.)), decompresia efectuată cu amestec cu 24% O_2 (r_{O_2} =0,24) va dura 15 ore şi 30 minute; dacă amestecul HELIOX respirat în timpul lucrului conține 20% O_2 (r_{O_2} =0,2 şi deci $p_{O_2} = r_{O_2}\, p_{am}$ = 0,2·10 =2 bar (sc. abs.)), decompresia efectuată cu amestec cu 24% O_2 (r_{O_2} = 0,24) va dura numai 10 ore şi 40 minute.

La fel de concludente sunt şi tabelele 4.4 şi 4.5, care prezintă comparativ duratele de decompresie pentru scufundări efectuate cu utilizarea amestecurilor respiratorii caracterizate prin diferite concentrații de oxigen.

Astfel, din tabelul 4.5 se observă că pentru o scufundare cu amestec azot-oxigen de 100 minute la o adâncime de 30 m (p_{am} =4 bar (sc. abs.)), durata decompresiei cu aer (r_{O_2} =0,21) este de 88,4 minute, cu amestec NITROX cu 30% O_2 (r_{O_2} =0,3) este de 45,6 minute, cu amestec NITROX cu 40% O_2 (r_{O_2} =0,4) este de 20,8 minute, iar cu amestec NITROX cu 50% O_2 (r_{O_2} =0,5) este de numai 2,8 minute.

Tabelul 4.4

Comparație între duratele decompresiei la scufundări folosind amestecuri respiratorii heliu-oxigen (HELIOX) cu diferite concentrații de oxigen

(decompresii calculate după metoda COMEX – Franța)

Scufundare de 1 oră la 90 m adâncime				
Amestec respirator de lucru	2/98*			20/80
Amestec respirator la decompresie	12/88	24/76	36/64	24/76
Durata totală a decompresiei [ore.minute]	20.30	15.50	12.30	10.40

*Rapoartele din acest tabel se citesc: 2% O_2 şi 98% He

Tabelul 4.5

Comparație între duratele decompresiei la scufundări folosind amestecuri respiratorii azot-oxigen (NITROX) cu diferite concentrații de oxigen
(decompresii calculate după metoda Laboratorului Hiperbar din Constanța)

Scufundare de 100 minute la 30 m adâncime				
Amestec respirator	Aer	NITROX		
	21% O_2	30% O_2	40% O_2	50% O_2
Durata totală a decompresiei [minute]	88,4	45,6	20,8	2,8

4.2.2. GAZELE DILUANTE PENTRU OXIGEN

Pentru contracararea efectelor hiperoxiei, oxigenul trebuie diluat prin amestecare cu gaze diluante, zise şi gaze "inerte". Dintre acestea, în continuare sunt prezentate cele mai utilizate gaze diluante în fabricarea amestecurilor respiratorii.

4.2.2.1. Azotul

Ca şi oxigenul, *azotul* este un gaz incolor, inodor şi insipid, aflându-se în componența tuturor organismelor în viață. Este componentul principal al aerului atmosferic, unde se găseşte în proporție de 78...79%. În scufundare, azotul se foloseşte ca diluant al oxigenului, fie în amestecul natural, aerul atmosferic, fie în amestecuri sintetice. În tabelul 4.6 sunt prezentate cele mai importante caracteristici fizice ale azotului.

Tabelul 4.6

Proprietățile fizice ale azotului

Mărimea	Valoarea	Mărimea	Valoarea
Volumul molar $[m^3/kmol]$	22,403	$k/\mu c_v$	1,95
Masa molară $[kg/kmol]$	28,013	$D\rho/\mu$	$1{,}33 \cdot 10^{-3}$
Temperatura critică T_{cr} [K]	126,1	Constante Van der Waals: a – at/(ℓ/mol)^2; b – ℓ/mol	1,39; 0,0394
Temperatura de fierbere la 1,013 bar (sc. abs.) T_f [K]	77,4	Presiunea critică p_{cr} [ata]	33,5
Conductibilitatea termică k [μcal/cm·s·K]	58,0	T_f/T_{cr}	0,61
Coeficientul de autodifuzie D[cm^2/s]	0,178	Diametrul moleculei [Å]	3,76
Densitatea ρ[g/ℓ]	1,251	Solubilitatea în apă [ℓ/ℓ]	0,0155
Coeficientul dinamic de viscozitate μ[micropoise]	167,4	Solubilitatea în alcool etilic [ℓ/ℓ]	0,1304
Căldura specifică masică la volum constant c_v [cal/g K]	0,177	Solubilitatea în benzen [ℓ/ℓ]	0,1038

Din punct de vedere chimic, aerul atmosferic se compune din 78...79% azot (r_{N_2} =0,78...0,79), 20...21% oxigen r_{O_2} =0,20...0,21, 0,03...0,04% dioxid de carbon (r_{CO_2} =0,0003...0,0004), 0,01% gaze rare (r_{gr} =0,0001) şi 0,2...0,6% vapori de apă (r_{H_2O} =0,002...0,006). Prin compoziţia sa chimică, aerul influenţează schimbul de gaze dintre organism şi mediu. În acest sens, omul inhalează zilnic 14...15 m^3 de aer, volum exprimat în condiţii normale (m^3_N), ceea ce reprezintă o cantitate mult mai mare faţă de apă (2,5 dm^3) sau alimente (1,5 kg). În plus, contactul dintre aer şi organism, măsurat la nivelul aparatului respirator, se realizează pe o suprafaţă de peste 90 m^2.

Pe timpul respiraţiei, componenţa aerului se modifică conform datelor prezentate în tabelul 4.7.

Pentru nevoi de scufundare, în vederea executării diferitelor calcule, inclusiv calculul tabelelor de decompresie, se poate face următoarea aproximaţie a compoziţiei aerului atmosferic: azot 79% (r_{N_2} =0,79); oxigen 21% (r_{O_2} =0,21).

Tabelul 4.7

Modificarea componenţei aerului pe timpul respiraţiei

Component	Proporţia componentelor din aer [%]	
	inspirat	expirat
Azot	78…79	78…79
Oxigen	20..21	16…17
Dioxid de carbon	0,03...0,04	3...4

În amestecuri respiratorii sintetice, azotul se foloseşte la scufundări în saturaţie până la 50...70 m adâncime. Tot în amestecuri sintetice, azotul se foloseşte şi pentru scufundări autonome cu aşa numitele amestecuri supraoxigenate, în care concentraţia oxigenului poate fi 30 (32 sau 32,5), 40, 50, 60% ceea ce corespunde unor participaţii volumice r_{O_2} =0,30 (0,32 sau 0,325); 0,40; 0,50; 0,60. Adâncimea de scufundare cu astfel de amestecuri este limitată de efectul toxic datorat presiunii parţiale a oxigenului crescute.

Scufundările cu amestecuri azot-oxigen (NITROX) supraoxigenate au câştig de cauză la adâncimi cuprinse între 18 şi 54 m datorită siguranţei pe care o conferă faţă de scufundarea cu aer. Aceste amestecuri NITROX supraoxigenate sunt utilizate în mod curent la aparatele de respirat sub apă autonome cu circuit deschis, închis, semiînchis şi mixt.

Azotul se mai foloseşte injectat în amestecuri pe bază de heliu-oxigen pentru scufundări profunde, în proporţie de 5...10% (r_{N_2} =0,05...0,1), în vederea ameliorării sindromului nervos al înaltelor presiuni (S.N.I.P.). Aceste amestecuri ternare heliu-azot-oxigen se mai numesc şi TRIMIX.

În ţara noastră, prin cercetările şi experimentările efectuate la Laboratorul Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri din Constanţa, aparţinând Forţelor Navale Române, au fost puse la punct tehnologii de pătrundere sub apă cu aer şi cu amestecuri azot-oxigen, elaborându-se tabele de decompresie pentru scufundări cu aer, tabele de decompresie pentru scufundări cu amestecuri NITROX supraoxigenate şi tabele de

decompresie pentru scufundări cu amestecuri NITROX în condiții de saturație. Aceste tehnologii şi-au găsit aplicația în operațiunile cu scafandri efectuate la instalațiile petroliere offshore din Marea Neagră, pentru amplasarea şi controlul periodic al platformelor de foraj marin şi al conductelor submarine.

4.2.2.2. HELIUL

Heliul este un gaz monoatomic, incolor, inodor şi insipid. Este total inert, atât de inert încât nu se combină nici cu el însuşi. Este un gaz insolubil în apă. Heliul este un element rar, găsit în aerul atmosferic numai în proporție de 1:200000. În tabelul 4.8 sunt prezentate cele mai importante caracteristici fizice ale heliului.

Tabelul 4.8

Proprietățile fizice ale heliului

Mărimea	Valoarea
Volumul molar $[\mathrm{m^3/kmol}]$	22,43
Masa molară $[\mathrm{kg/kmol}]$	4,002
Temperatura critică T_{cr} [K]	5,26
Temperatura de fierbere la 1,013 bar (sc. abs.) T_f [K]	4,26
Conductibilitatea termică k $[\mu\mathrm{cal/cm \cdot s \cdot K}]$	352,0
Coeficientul de autodifuzie $D[\mathrm{cm^2/s}]$	-
Densitatea $\rho\,[\mathrm{g}/\ell]$	0,1785
Coeficientul dinamic de viscozitate μ[micropoise]	188,7
Căldura specifică masică la volum constant c_v [cal/g K]	0,745

Mărimea	Valoarea
$k/\mu c_v$	2,50
$D\rho/\mu$	-
Constante Van der Waals: a – at/(ℓ/mol)^2 b – ℓ/mol	0,034 0,0236
Presiunea critică p_{cr} [ata]	2,26
T_f/T_{cr}	0,81
Diametrul moleculei [Å]	2,17
Solubilitatea în apă $[\ell/\ell]$	0,0088
Solubilitatea în alcool etilic $[\ell/\ell]$	0,0281
Solubilitatea în benzen $[\ell/\ell]$	0,0180

Heliul a fost descoperit în anul 1868, prin analiza spectrografică a Soarelui de unde şi numele de Helios, numele grecesc al Soarelui. Heliul este de 70 de ori mai uşor decât aerul şi a fost folosit, la începutul secolului XX, pentru umplerea baloanelor şi a dirijabilelor. Heliul se găseşte în cantități ceva mai mari în gazele naturale din unele zone din S.U.A., Canada şi Federația Rusă.

În scufundare, heliul se foloseşte ca diluant al oxigenului. Heliul are dezavantajele unei distorsionări a spectrului sonor provocând fenomenul cunoscut sub numele de *efectul Donald Duck* şi unei foarte ridicate conductibilități termice, ceea ce cauzează răcirea rapidă a organismului prin intermediul respirației.

Ideea folosirii heliului ca înlocuitor al azotului în amestecurile respiratorii, pentru eliminarea efectului narcotic al acestuia din urmă, aparține lui Edgar End,

internist la spitalul din Milwaukee County, Wisconsin, SUA şi datează din anul 1937. Acesta, împreună cu un scafandru, Max Gene Nohl, au respirat un amestec binar heliu-oxigen într-o barocameră a spitalului, la adâncimea de 30 m. După acest experiment a urmat o serie de scufundări în lacul Michigan la adâncimi tot mai mari. În final, utilizând aparatul autonom al lui Nohl, Frank Crilley a stabilit un nou record mondial, în decembrie 1937, scufundându-se la 128 m adâncime.

După aceste experimentări şi datorită faptului că nevoile operaţionale au impus lucrul sub apă la adâncimi tot mai mari, utilizarea heliului s-a generalizat, atingându-se adâncimea record de 686 m în cadrul programului ATLANTIS, printr-o scufundare efectuată de către americani la Duke University. Europenii, la rândul lor, au extins tehnologiile de pătrundere sub apă cu amestecuri heliu-oxigen. Astfel, tot mai multe state interesate în exploatarea mărilor şi oceanelor, anunţă performanţe în jurul adâncimii de 500 m, printre care Franţa, Anglia, Norvegia, Germania, România etc.

4.2.2.3. HIDROGENUL

Hidrogenul este un gaz biatomic, incolor, inodor şi insipid. Acesta este atât de activ încât se găseşte foarte rar în stare liberă. În tabelul 4.9 se prezintă principalele caracteristici fizice ale hidrogenului.

Tabelul 4.9

Proprietăţile fizice ale hidrogenului

Mărimea	Valoarea	Mărimea	Valoarea
Volumul molar $[m^3/kmol]$	22,428	$k/\mu c_v$	2,03
Masa molară $[kg/kmol]$	2,016	$D\rho/\mu$	$1{,}36 \cdot 10^{-3}$
Temperatura critică T_{cr} [K]	33,3	Constante Van der Waals: a – at/(ℓ/mol)^2; b – ℓ/mol	0,245; 0,0267
Temperatura de fierbere la 1,013 bar (sc. abs.) T_f [K]	20,4	Presiunea critică p_{cr} [ata]	12,8
Conductibilitatea termică k $[\mu cal/cm \cdot s \cdot K]$	416,0	T_f/T_{cr}	0,61
Coeficientul de autodifuzie $D[cm^2/s]$	1,285	Diametrul moleculei [Å]	2,72
Densitatea $\rho[g/\ell]$	0,0899	Solubilitatea în apă $[\ell/\ell]$	0,0182
Coeficientul dinamic de viscozitate μ[micropoise]	85,0	Solubilitatea în alcool etilic $[\ell/\ell]$	0,0769
Căldura specifică masică la volum constant c_v [cal/g K]	2,411	Solubilitatea în benzen $[\ell/\ell]$	0,06590

Primele încercări de utilizare a hidrogenului în scufundare, ca înlocuitor al azotului şi heliului, au fost efectuate de Marina Militară Suedeză. În anul 1945, inginerul suedez Arne Zetterström a investigat pentru prima dată posibilităţile de folosire a

amestecului hidrogen-oxigen (HIDROX) în scufundare. Acesta a efectuat o scufundare la 156 m adâncime în Marea Baltică. Din păcate, Zetterström moare într-un accident, pe timpul revenirii la presiunea atmosferică, datorat unei avarii la vinciul de ridicare, accident ce nu a avut nimic comun cu folosirea amestecului respirator hidrogen-oxigen.

După acest eveniment tragic, problema utilizării hidrogenului în scufundare a rămas în suspensie mulți ani. Abia în anul 1968, francezii de la COMEX reiau ideea inițiind programul HYDRA, care a culminat în anul 1992 cu experimentul uman HYDRA X la 701 m adâncime. Amestecul respirator utilizat a fost un amestec ternar hidrogen-heliu-oxigen (HIDRELIOX).

În continuare, sunt expuse principalele motive pentru care s-a impus ca necesară utilizarea hidrogenului în realizarea amestecurilor respiratorii destinate tehnologiilor de scufundare.

În primul rând, hidrogenul este un gaz uşor, se găseşte din abundență în natură şi, în plus, are capacitatea de a dilua oxigenul pentru a-l face respirabil în doze convenabile.

După numeroase experiențe pe animale, efectuate de Brauer în S.U.A., Orhagen în Suedia şi echipa condusă de H. G. Delauze în Franța, s-a demonstrat că hidrogenul nu este toxic. Utilizarea hidrogenului ca diluant al oxigenului în amestecuri respiratorii are o dublă perspectivă:

- amelioarea compartimentului profesional al intervențiilor sub apă, între 300 şi 500 m adâncime;
- posibilitatea de a se atinge pragul de 700 m adâncime, în condițiile de securitate, confort şi eficiență, pe care nici un alt gaz nu le permite.

Celelalte gaze inerte au fost mai puțin utilizate în scufundare. Totuşi, dintre acestea se detaşează *neonul* care, datorită proprietăților sale de a nu distorsiona spectrul sonor şi de a fi un izolant termic superior, a devenit un subiect de cercetare în domeniul amestecurilor respiratorii utilizate pentru pătrunderea omului sub apă.

4.3. AMESTECURI RESPIRATORII

Amestecurile respiratorii sunt amestecuri gazoase cu două sau trei componente, o componentă fiind oxigenul, iar celelalte componente fiind gazele inerte. Aceste amestecuri rezultă din amestecarea, în proporție dorită, a două sau trei din gazele prezentate în paragrafele anterioare, unul dintre ele fiind întotdeauna oxigenul.

După numărul componentelor principale din amestecurile respiratorii, acestea se împart în: amestecuri binare (cu două componente) şi amestecuri ternare (cu trei componente).

Amestecurile respiratorii binare, cel mai des utilizate în domeniul pătrunderii omului sub apă, sunt amestecurile azot-oxigen, cunoscute sub denumirea de amestecuri NITROX şi amestecurile heliu-oxigen denumite amestecuri HELIOX. Pentru scufundările autonome, aceste tipuri de amestecuri sunt standardizate din punct de vedere al conținutului de oxigen. Cele mai frecvente amestecuri respiratorii utilizate în scufundări autonome sunt cele caracterizate prin următoarele concentrații ale oxigenului: 30% (32% sau 32,5%), 40%, 50% şi 60%, deci prin următoarele participații volumice ale oxigenului r_{O_2} în amestec: 0,30 (0,32 sau 0,325); 0,40; 0,50 şi 0,60. În ultimii ani

se utilizează, în mod experimental, şi amestecuri binare hidrogen-oxigen (HIDROX) cu concentraţii ale oxigenului mai mici de 4% ($r_{O_2} < 0{,}04$).

Pentru scufundări cu amestecuri respiratorii se ţine seama nu numai de concentraţia oxigenului din amestec ci şi de natura gazului inert, din punct de vedere al efectelor lui narcotice.

Amestecurile respiratorii ternare (TRIMIX) utilizate frecvent la pătrunderea omului sub apă, sunt amestecuri heliu-azot-oxigen. Pentru scufundări autonome şi aceste amestecuri sunt standardizate. În general, concentraţiile heliului şi azotului sunt egale, iar concentraţia oxigenului este funcţie de limitele impuse la utilizarea acestuia. Amestecurile ternare se folosesc şi în scufundări profunde. La astfel de scufundări, se utilizează amestecurile HELIOX în care se injectează azot necesar pentru ameliorarea S.N.I.P., obţinându-se în acest fel amestecuri ternare cu concentraţii ale azotului de 5...10% ($r_{N_2} = 0{,}05...0{,}10$).

Amestecurile heliu-azot-oxigen se fabrică, de obicei, plecându-se de la heliu în care se adaugă aer comprimat. Presiunea parţială maximă admisibilă a azotului în amestec pentru evitarea oricăror forme de nacoză este cea corespunzătoare azotului din aerul respirat la 30 m adâncime ($p_{am} = p_{aer} = 4$ bar (sc. abs.)), adică $(p_{N_2})_{\max} = r_{N_2} \cdot p_{am} = 0{,}79 \cdot 4 = 3{,}16$ bar (sc. abs.).

În cadrul experimentărilor de laborator, se mai utilizează şi amestecuri ternare hidrogen-heliu-oxigen (HIDRELIOX).

4.4. FABRICAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII

Amestecurile gazoase binare sau ternare utilizate în scufundare se pot fabrica fie printr-o injecţie succesivă şi controlată a gazelor componente în recipiente cu volum constant, urmărindu-se presiunea din recipienţi, fie printr-o amestecare în flux continuu, cu injectarea simultană a gazelor componente la proporţia dorită, utilizându-se pentru aceasta dispozitive prevăzute cu ajutaje calibrate lucrând în domeniul critic (sonic), ce asigură livrarea componentelor gazoase la debite masice constante.

4.4.1. FABRICAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII BINARE

Amestecurile azot-oxigen (NITROX) se fabrică de obicei, prin injectarea aerului comprimat într-un recipient în care se află oxigen la o anumită presiune.

Amestecurile heliu-oxigen (HELIOX) se fabrică prin injectarea de oxigen într-un recipient în care se află heliu la o anumită presiune.

Amestecurile respiratorii de gaze se fabrică prin comprimarea gazelor componente în recipienţi cu volume cunoscute. Dacă se lucrează la temperatură constantă, cantităţile de gaz comprimate în recipient se pot determina prin măsurarea variaţiilor de presiune din recipient rezultate în urma injectării gazelor pure sau amestecurilor de gaze. Principalele instrumente de măsură necesare fabricării amestecurilor de gaze sunt manometrul cu clasă de precizie corespunzătoare şi analizorul de oxigen. La analiza oxigenului din amestecul fabricat trebuie să se ţină cont că acestuia îi sunt necesare minim 12 ore pentru o bună omogenizare, iar pentru măsurarea presiunii, după comprimarea gazelor în recipient, este necesară trecerea unui anumit interval de

timp pentru ca temperatura amestecului să revină la temperatura ambiantă astfel încât să nu fie necesare corecții de calcul rezultate din temperatură. Deci, amestecurile gazoase respiratorii se fabrică în recipienți cu volume cunoscute şi la o temperatură constantă, repectiv temperatura ambiantă, ce permite aplicarea legii Boyle-Mariotte:

$$pV = \text{const.} \tag{4-1}$$

De asemenea, se ține cont şi de legea lui Dalton care arată că, la o temperatură dată, presiunea unui amestec gazos p_{am} este egală cu suma presiunilor parțiale ale fiecărui gaz component $p_{g_i} (i = 1,2 \ldots n)$. Astfel, pentru un amestec de n gaze, legea lui Dalton se poate scrie:

$$p_{am} = \sum_{i=1}^{n} p_{g_i} = p_{g_1} + p_{g_2} + \ldots + p_{g_i} + \ldots + p_{g_n}, \tag{4-2}$$

iar legea lui Amagat se scrie:

$$\sum_{i-1}^{n} r_{g_i} = r_{g_1} + r_{g_2} + \ldots + r_{g_i} + \ldots + r_{g_n} = 1. \tag{4-3}$$

Presiunea parțială a unui gaz component dintr-un amestec de gaze se obține prin înmulțirea presiunii amestecului de gaze cu participația volumică r_{g_i} a gazului component considerat:

$$p_{g_i} = p_{am}\, r_{g_i}. \tag{4-4}$$

Pentru a se putea calcula mai uşor un amestec de gaze în vederea fabricării acestuia, se propune o schemă simplă. Astfel, se reprezintă recipientul în care se doreşte prepararea amestecului cu un dreptunghi (fig. 4.1) şi se presupune că gazele rămân stratificate fără să se amestece. Deci, în dreptunghiul "recipient" se poate reprezenta fiecare gaz component înscriind în fiecare compartiment gazul sau amestecul de gaze considerat. În dreapta dreptunghiului "recipient" se notează presiunile parțiale finale ale fiecărui gaz sau amestec gazos component $p_{g_i,f}$ şi presiunea finală a amestecului $p_{am},_f$ exprimate în scară manometrică, iar în stânga se notează participațiile volumice $r_{g_i}^{(j)}$ ale gazului pur i din amestecurile injectate prin fiecare tranşă de injecție (j), precum şi concentrația finală dorită a acestui gaz $r_{g_i},_f$ din amestecul care este propus a fi obținut în recipient.

Pe baza schemei din figura 4.1 şi a relațiilor prezentate mai sus se poate exprima presiunea parțială finală a unui gaz component astfel:

$$\begin{gathered} p_{g_i,f} = p_{am,f}\, r_{g_i,f} = \\ = p_{g_1,f}\, r_{g_i}^{(1)} + p_{g_2,f}\, r_{g_i}^{(2)} + \ldots + p_{g_i,f}\, r_{g_i}^{(j)} + \ldots + p_{g_n,f}\, r_{g_i}^{(n)} \end{gathered} \tag{4-5}$$

unde exponentul $(j)[(j) = (1),(2)\ldots(n)]$ reprezintă numărul tranşei de injecție de gaze în recipient. Pentru o mai bună înțelegere, în cele ce urmează se prezintă câteva cazuri întâlnite mai des la fabricarea amestecurilor gazoase binare.

Participații volumice pentru gazul g_i — Finală — Pe tranșă; Presiuni finale — Presiuni parțiale — Presiunea amestecului

Tranșa (n): $r_{g_1}^{(n)} + r_{g_2}^{(n)} + \dots + r_{g_i}^{(n)} + \dots + r_{g_n}^{(n)} = 1$ — $r_{g_i}^{(n)}$ — $p_{g_n,f}$

Tranșa (3): $r_{g_1}^{(3)} + r_{g_2}^{(3)} + \dots + r_{g_i}^{(3)} + \dots + r_{g_n}^{(3)} = 1$ — $r_{g_i}^{(3)}$ — $p_{g_3,f}$

Tranșa (2): $r_{g_1}^{(2)} + r_{g_2}^{(2)} + \dots + r_{g_i}^{(2)} + \dots + r_{g_n}^{(2)} = 1$ — $r_{g_i}^{(2)}$ — $p_{g_2,f}$

Tranșa (1)

$r_{g_i,f}$ — $p_{am,f}$

Fig. 4.1. Schema generală de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator de gaz

4.4.1.1. Fabricarea unui amestec binar NITROX pornind de la gaze pure: oxigen şi azot

Schema recipientului pentru calculul fabricării amestecului NITROX din gaze pure este prezentată în figura 4.2.

r_{O_2}: Finală — Pe tranșă; p: Parțială — Amestec

Tranșa (2) N_2 — $r_{O_2}^{(2)}$ — $p_{N_2,f}$

Tranșa (1) O_2 — $r_{O_2}^{(1)}$ — $p_{O_2,f}$

$r_{O_2,f}$ — $p_{am,f}$

Fig. 4.2. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator NITROX pornind de la oxigen şi azot.

Pentru acest caz, relația (4-5) devine:

$$p_{O_2,f} = p_{am,f}\, r_{O_2,f} = p_{O_2,f}\, r_{O_2}^{(1)} + p_{N_2,f}\, r_{O_2}^{(2)} . \qquad (4\text{-}6)$$

Astfel, calculul fabricării unui amestec NITROX 30/70 (30% oxigen şi 70% azot) la presiunea de 200 bar (sc. man.), se reduce la rezolvarea ecuației scrise pe baza schemei de calcul din figura 4.3:

$$200 \cdot 0{,}3 = x \cdot 1 + (200 - x) \cdot 0 , \qquad (4\text{-}7)$$

de unde rezultă $x = 60$ bar (sc. man.) care reprezintă atât valoarea presiunii parțiale finale a oxigenului cât şi presiunea la sfârşitul primei tranşe de presurizare a recipientului prin injecție de oxigen pur.

r_{O_2} — p [bar (sc. man.)]

Tranșa (2) N_2 — 0 — 200-x

Tranșa (1) O_2 — 1 — x

0,3 — 200

Fig. 4.3. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator

NITROX 30/70 din oxigen şi azot.

Prin urmare, amestecul NITROX 30/70 la 200 bar (sc. man.) se va fabrica astfel: se presurizează recipientul mai întâi cu oxigen pur până când presiunea devine 60 bar (sc. man.), apoi se presurizează în continuare recipientul cu azot pur cu încă 140 bar, până când presiunea amestecului din recipient devine egală cu 200 bar (sc. man.).

4.4.1.2. Fabricarea unui amestec NITROX din oxigen şi aer

Având în vedere normele de tehnica securităţii muncii, este recomandabil să se evite manevrarea oxigenului pur la presiuni înalte, motiv pentru care, pentru fabricarea unui amestec binar NITROX din oxigen şi aer, se va proceda la injectarea de aer (21% oxigen şi 79% azot) în oxigenul stocat în recipient.

Astfel, pentru fabricarea unui amestec NITROX 30/70 (30% oxigen şi 70% azot) la presiunea de 200 bar (sc. man.), se va rezolva ecuaţia de mai jos, corespunzătoare schemei de calcul din figura 4.4:

$$p_{am,f}\, r_{N_2,f} = p_{O_2,f}\, r_{N_2}^{(1)} + p_{aer,f}\, r_{N_2}^{(2)}, \qquad (4\text{-}8)$$

adică:

$$200 \cdot 0{,}7 = (200 - x) \cdot 0 + x \cdot 0{,}79, \qquad (4\text{-}9)$$

de unde rezultă $x = 177{,}2$ bar (sc. man.).

Deci, amestecul NITROX 30/70 la 200 bar (sc. man.) se va fabrica astfel: se presurizează mai întâi cu oxigen pur până când presiunea devine 200-177,2 = 22,8 bar (sc. man.), după care se continuă presurizarea cu încă 177,2 bar cu aer, până când presiunea amestecului din recipient devine egală cu 200 bar (sc. man.).

0,7	0,79	Tranşa (2) AER ($r_{O_2} = 0{,}21$; $r_{N_2} = 0{,}79$)	x	200
	0	Tranşa (1) O_2	$200-x$	

Fig. 4.4. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator NITROX 30/70 din oxigen şi aer.

Deoarece amestecurile respiratorii binare NITROX sunt cele mai utilizate în scufundările industriale, dar mai ales în cele cu scop militar şi datorită faptului că metoda fabricării acestor amestecuri prin injectare succesivă de oxigen şi aer este cea mai utilizată, în tabelul 4.10 se prezintă variaţiile de presiune rezultate prin cele două tranşe de presurizare, mai întâi cu oxigen şi apoi cu aer, în vederea obţinerii amestecurilor respiratorii binare NITROX, cel mai des utilizate în scufundarea autonomă civilă şi militară, la o presiune finală de 200 bar (sc. man.). La fabricarea amestecurilor NITROX se utilizează oxigen cu puritate ridicată (minimum 99,5% O_2) şi aer respirator corespunzător normativelor în vigoare (21% O_2 şi 79% N_2).

Tabelul 4.10

Fabricarea amestecurilor NITROX prin injectarea succesivă de oxigen şi aer

Amestec NITROX [$\%O_2$ / $\%N_2$]	Presiunea din recipient după presurizarea cu oxigen pur [bar (sc. man.)]	Creşterea de presiune prin presurizarea cu aer [bar]	Presiunea finală a amestecului [bar (sc. man)]
60/40	98,7	101,3	200
50/50	73,4	126,6	200
40/60	48,1	151,9	200
32,5/67,5	29,1	170,9	200
32/68	27,8	172,2	200
30/70	22,8	177,2	200

4.4.1.3. Fabricarea unui amestec HELIOX din heliu şi oxigen

Datorită diferenţei mari de densitate dintre cele două gaze, întotdeauna se injectează oxigenul peste heliu şi aceasta cât mai violent posibil pentru a se realiza o mai bună omogenizare a amestecului. Spre exemplu, pentru fabricarea unui amestec HELIOX 20/80 (20% oxigen şi 80% heliu) la 200 bar (sc. man.), schema recipientului va fi cea din figura 4.5, iar ecuaţia corespunzătoare va fi:

$$p_{am,f}\ r_{O_2,f} = p_{He,f}\ r_{O_2}^{(1)} + p_{O_2,f}\ r_{O_2}^{(2)}, \qquad (4\text{-}10)$$

adică:

$$200 \cdot 0{,}2 = (200 - x)\cdot 0 + x \cdot 1, \qquad (4\text{-}11)$$

de unde rezultă $x = 40$ bar (sc. man.).

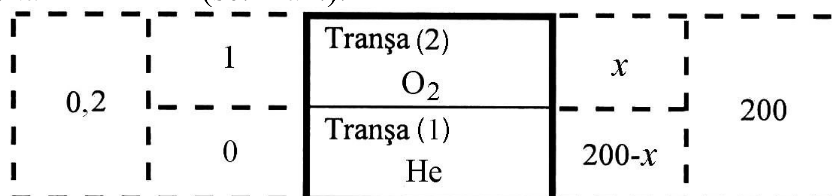


Fig. 4.5. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator HELIOX 20/80 din heliu şi oxigen.

Prin urmare, amestecul HELIOX 20/80 la 200 bar (sc. man.) se va fabrica astfel: se presurizează recipientul mai întâi cu heliu pur până la presiunea 200 – 40 = 160 bar (sc. man.), iar, în continuare, se continuă presurizarea cu încă 40 bar cu oxigen pur până când presiunea amestecului din recipient devine egală cu 200 bar (sc. man.).

4.4.1.4. Fabricarea unui amestec HELIOX din alte amestecuri HELIOX şi gaze pure

Metoda de fabricare a unui amestec HELIOX din alt amestec HELIOX, se utilizează atunci când se doreşte economisirea heliului. Spre exemplu, se consideră un amestec HELIOX 10/90 (10% O_2 şi 90% He) aflat într-un recipient la presiunea de 20 bar (sc. man.) şi un amestec HELIOX 14/86 (14% O_2 şi 86% He) aflat într-un alt recipient la presiunea de 160 bar (sc. man.) şi se doreşte ca să se fabrice un amestec HELIOX 12/88 (12% O_2 şi 88% He) la 200 bar (sc. man.). Iniţial, nu se cunoaşte dacă

trebuie adăugat heliu sau oxigen pur şi, de aceea, schema iniţială a recipientului de calcul va fi cea din figura 4.6, iar ecuaţia corespunzătoare va fi:

$$200 \cdot 0{,}12 = x \cdot 1 + 160 \cdot 0{,}14 + (200 - 160 - 20 - x) \cdot 0 + 20 \cdot 0{,}10 \qquad (4\text{-}12)$$

r_{O_2}			p [bar (sc. man.)]	
0,12	1	O_2	x	200
	0,14	HELIOX 14/86 (r_{O_2}=0,14, r_{He}=0,86)	160	
	0	He	200-160-20-x	
	0,10	HELIOX 10/90	20	

Fig. 4.6. Schema iniţială de calcul pentru fabricarea unui amestec HELIOX 12/88 din alte amestecuri HELIOX şi gaze pure.

de unde rezultă $x = -0{,}4$, lucru imposibil. De aceea, se revine asupra schemei recipientului, renunţându-se la injectarea oxigenului. Schema recipientului de calcul va fi cea din figura 4.7, iar ecuaţia corespunzătoare va fi:

$$200 \cdot 0{,}12 = x \cdot 0{,}14 + (200 - 20 - x) \cdot 0 + 20 \cdot 0{,}10 \qquad (4\text{-}13)$$

de unde rezultă $x = 157{,}14$ bar (sc. man.)

r_{O_2}			p [bar (sc. man.)]	
0,12	0,14	HELIOX 14/86 (r_{O_2}=0,14, r_{He}=0,86)	x	200
	0	He	200 - 20 - x	
	0,10	HELIOX 10/90	20	

Fig. 4.7. Schema finală de calcul pentru fabricarea unui amestec HELIOX 12/88 din alte amestecuri HELIOX şi gaze pure.

Deci, amestecul HELIOX 12/88 la 200 bar (sc. man.) se obţine astfel: recipientul conţinând amestecul HELIOX 10/90 la presiunea de 20 bar (sc. man.) se presurizează, în continuare, cu încă 200 - 20 - 157,14 = 22,86 bar (sc. man.), cu heliu pur, după care se continuă presurizarea cu încă 157,14 bar (sc. man.) cu amestc HELIOX 14/86 până când presiunea amestecului din recipient devine egală cu 200 bar (sc. man.).

4.4.2. FABRICAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII TERNARE

Pentru fabricarea amestecurilor ternare se aplică aceeaşi metodă ca cea prezentată la fabricarea amestecurilor binare. Astfel, pentru fabricarea amestecurilor ternare heliu-azot-oxigen se pot utiliza fie heliu şi aer, fie heliu şi amestec binar azot-oxigen (NITROX). În primul caz se presurizează mai întâi recipientul cu heliu, apoi se continuă presurizarea cu aer. În al doilea caz, se fabrică mai întâi amestecul binar NITROX care apoi se injectează în recipient peste heliu.

4.5. CORECTAREA AMESTECURILOR DE GAZE

Indiferent de metoda utilizată pentru fabricarea amestecurilor de gaze, este necesar controlul permanent al participațiilor gazelor componente ale amestecurilor cu ajutorul unor analizoare de gaze specializate şi corectarea acestora în vederea obținerii amestecurilor dorite.

Corectarea amestecurilor respiratorii de gaze se face după analiza lor din punct de vedere al concentrației de oxigen. În cele ce urmează se vor prezenta patru cazuri de corecție a amestecurilor respiratorii.

4.5.1. CORECTAREA UNUI AMESTEC HELIOX PREA SĂRAC ÎN OXIGEN

Se consideră că se dispune de un amestec HELIOX 10/90 (10% O_2 şi 90% He) aflat într-un recipient la presiunea de 180 bar (sc. man.) şi se doreşte corectarea acestuia pentru obținerea unui amestec HELIOX 12/88 (12% O_2 şi 88% He). În acest caz nu se cunoaşte presiunea finală a amestecului dorit. Schema recipientului este cea din figura 4.8, iar ecuația corespunzătoare va fi:

$$x \cdot 0{,}88 = 180 \cdot 0{,}9 + (x - 180) \cdot 0, \qquad (4\text{-}14)$$

de unde rezultă x = 184 bar (sc. man.)

Prin urmare, amestecul HELIOX 12/88 se obține astfel: peste amestecul HELIOX 10/90 aflat la 180 bar (sc. man.) se injectează 4 bar (sc. man.) oxigen pur, până când presiunea ajunge la valoarea finală de 184 bar (sc. man.).

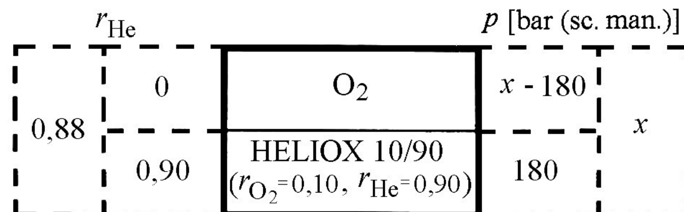


Fig. 4.8. Schema de calcul privind corectarea amestecului HELIOX 10/90 pentru obținerea amestecului HELIOX 12/88.

4.5.2. CORECTAREA UNUI AMESTEC HELIOX PREA BOGAT ÎN OXIGEN

Datorită diferenței mari de densitate dintre heliul pur şi un amestec HELIOX, întotdeauna amestecul HELIOX se va injecta peste heliul aflat în recipient.

Spre exemplu, se consideră un amestec HELIOX 12/88 (12% O_2 şi 88% He) la presiunea de 150 bar (sc. man.) şi se doreşte corectarea acestuia în vederea obținerii unui amestec HELIOX 10/90 (10% O_2 şi 90% He). Şi în acest caz nu se cunoaşte presiunea finală a amestecului dorit. Pentru o astfel de corectare pot fi folosite două variante: varianta utilizării unui compresor şi a unei başe recuperatoare şi varianta utilizării unui surpresor.

a. *Dacă pentru fabricarea amestecului se foloseşte un compresor şi o başă recuperatoare*, se poate utiliza întregul amestec HELIOX şi schema recipientului de calcul este prezentată în figura 4.9.

Fig. 4.9. Schema de calcul pentru fabricarea amestecului HELIOX 10/90 prin corectarea unui amestec HELIOX 12/88 (cazul utilizării unui compresor şi a unei başe recuperatoare).

Se poate scrie ecuația corespunzătoare acestui caz:

$$x \cdot 0{,}10 = 150 \cdot 0{,}12 + (x - 150) \cdot 0, \tag{4-15}$$

de unde rezultă x = 180 bar (sc. man.)

Deci, în acest caz, pentru obținerea amestecului HELIOX 10/90 se procedează astfel: într-un recipient cu heliu la 30 bar (sc. man.) se vor injecta 150 bar (sc. man.) amestec HELIOX 12/88, deci până presiunea finală din recipient devine 180 bar (sc. man.).

b. *Dacă pentru fabricarea amestecului se foloseşte un surpresor* care aspiră de la 20 bar (sc. man.) atunci din amestecul HELIOX 12/88 se pot utiliza numai 130 bar (sc. man.), iar schema de calcul este arătată în figura 4.10.

Fig. 4.10. Schema de calcul pentru fabricarea amestecului HELIOX 10/90 prin corectarea unui amestec HELIOX 12/88 (cazul utilizării unui surpresor).

Se poate scrie ecuația pentru acest caz:

$$x \cdot 0{,}10 = 130 \cdot 0{,}12 + (x - 130) \cdot 0, \tag{4-16}$$

de unde rezultă x = 156 bar (sc. man.).

Deci, în acest caz, pentru obținerea amestecului HELIOX 10/90 se procedează astfel: într-un recipient cu heliu la 26 bar (sc. man.) se vor injecta 130 bar (sc. man.) amestec HELIOX 12/88, până când presiunea finală din recipient devine 156 bar (sc. man.)

4.5.3. CORECTAREA UNUI AMESTEC NITROX PREA SĂRAC ÎN OXIGEN

În principiu, ar trebui injectat oxigen în amestecul NITROX inițial dar, din motive de protecția muncii este preferabil să se injecteze amestecul NITROX inițial peste oxigen.

Spre exemplu, se consideră un amestec NITROX 30/70 (30% O_2 şi 70% N_2) aflat la presiunea de 160 bar (sc. man.) şi se doreşte realizarea unui amestec NITROX 40/60 (40% O_2 şi 60% N_2). Schema de calcul este prezentată în figura 4.11.

r_{O_2} | | | p [bar (sc. man.)]

0,60	0,70	NITROX 30/70 (r_{O_2}=0,30, r_{N_2}=0,70)	160	x
	0	O_2	x - 160	

Fig. 4.11. Schema de calcul pentru fabricarea amestecului NITROX 40/60 prin corectarea unui amestec NITROX 30/70.

Ecuația caracteristică a acestui caz este:

$$x \cdot 0{,}60 = 160 \cdot 0{,}70 + (x - 160) \cdot 0 \,, \tag{4-17}$$

de unde rezultă x = 186 bar (sc. man.)

Prin urmare, amestecul NITROX 40/60 se obține astfel: într-un recipient cu oxigen aflat la presiunea de 26 bar (sc. man.), se injectează 160 bar (sc. man.) de amestec NITROX 30/70 până când presiunea din recipient devine egală cu 186 bar (sc. man.).

4.5.4. CORECTAREA UNUI AMESTEC NITROX PREA BOGAT ÎN OXIGEN

Pentru efectuarea unei astfel de corectări, s-ar putea injecta azot în amestecul inițial de NITROX prea bogat în oxigen dar, din motive de economie, se preferă injectarea de aer, acesta fiind oricând la dispoziție.

Spre exemplu, se consideră că se dispune de un amestec NITROX 40/60 (40% O_2 şi 60% N_2) la presiunea de 130 bar (sc. man.) şi se doreşte realizarea unui amestec NITROX 30/70 (30% O_2 şi 70% N_2).

Schema de calcul pentru acest caz este prezentată în figura 4.12.

r_{O_2} | | | p [bar (sc. man.)]

0,30	0,21	AER (r_{O_2}=0,21, r_{N_2}=0,79)	x	130 + x
	0,40	NITROX 40/60 (r_{O_2}=0,40, r_{N_2}=0,60)	130	

Fig. 4.12. Schema inițială de calcul pentru fabricarea amestecului NITROX 30/70 prin corectarea unui amestec NITROX 40/60.

Ecuația caracteristică acestui caz este:

$$(130 + x) \cdot 0{,}30 = x \cdot 0{,}21 + 130 \cdot 0{,}40 \,, \tag{4-18}$$

de unde rezultă x = 144 bar (sc. man.). Presiunea finală ar fi 130 + 144 = 274 bar (sc. man.), aceasta depăşind presiunea maximă admisibilă a recipientului. De aceea, datele problemei vor fi modificate, impunându-se presiunea finală a amestecului dorit de 196 bar (sc. man.) şi, pentru acest caz, noua schemă de calcul este prezentată în figura 4.13.

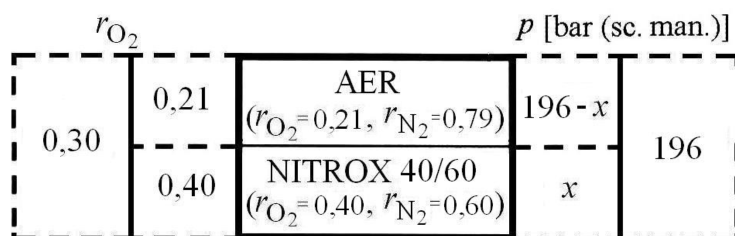


Fig. 4.13. Schema finală de calcul pentru fabricarea amestecului NITROX 30/70 prin corectarea unui amestec NITROX 40/60.

Pentru noua schemă de calcul se poate scrie ecuația:

$$196 \cdot 0{,}30 = (196 - x) \cdot 0{,}21 + x \cdot 0{,}40 , \qquad (4\text{-}19)$$

de unde rezultă x = 93 bar (sc. man.).

Prin urmare, pentru fabricarea amestecului NITROX 30/70 va trebui să se transvazeze sau să renunțe la 130 – 93 = 37 bar (sc. man.) din amestecul NITROX 40/60 pentru a se putea face corecția impusă. Apoi, peste amestecul NITROX 40/60 aflat la 93 bar (sc. man.) se injectează 196 – 93 = 103 bar (sc. man.) aer până când presiunea finală din recipient devine egală cu 196 bar (sc. man.).

4.6. INSTALAȚII PENTRU FABRICAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII

Pentru exemplificarea modului concret în care se fabrică amestecurile respiratorii pentru scufundare, în figura 4.14 se prezintă *schema unei instalații pentru fabricarea de amestecuri NITROX* în vederea încărcării cu acest amestec a buteliilor de scafandru.

Instalația este alcătuită, în primul rând, dintr-un *compresor de aer*, la ieşirea căruia s-a prevăzut un *element de filtrare suplimentar* pentru eliminarea tuturor urmelor de ulei. De aici, aerul sub presiune este trimis la tabloul de manevră şi control (fig. 4.15). Acesta comportă şi o a doua intrare şi anume intrarea oxigenului pur furnizat de *butelii de oxigen* de 50 l cu oxigen stocat la 200 bar (sc. man.). Cele două circuite, echipate cu robinete şi clapete anti-retur, duc la un ansamblu de *butelii tampon* (fig. 4.16) unde se stochează amestecul NITROX primar 40/60 (40% oxigen şi 60% azot) obținut prin amestecare de oxigen şi aer. Trebuie menționat faptul că doar partea de circuit cuprinsă între buteliile de oxigen pur şi buteliile tampon de NITROX 40/60 trebuie degresate conform normelor de lucru cu oxigen, prin restul circuitelor de umplere, între buteliile tampon şi *buteliile de scufundare*, circulând amestecuri NITROX cu un procentaj de oxigen de până la 40%, deci fără risc.

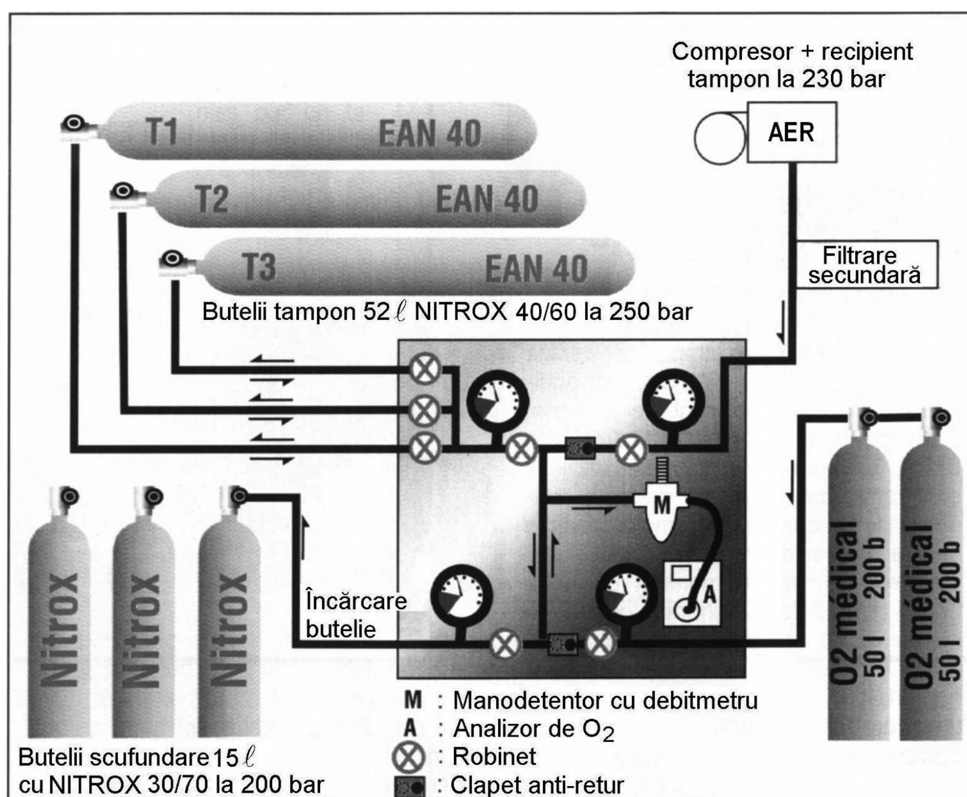


Fig. 4.14. Schema unei instalații de fabricare de amestecuri NITROX pentru încărcarea buteliilor de scafandru.

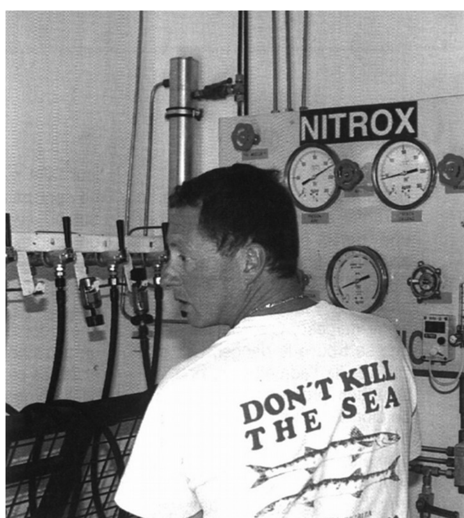


Fig. 4.15. Tabloul de manevră şi control al instalației de preparare a amestecurilor NITROX.

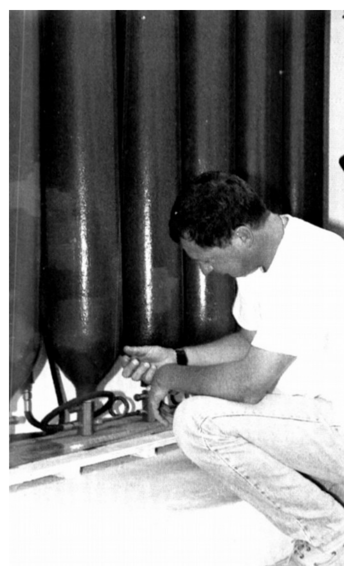


Fig. 4.16. Buteliile tampon pentru stocarea de amestec NITROX primar 40/60.

În continuare, se prezintă un exemplu concret de preparare a unui amestec NITROX 30/70 (30% oxigen şi 70% azot) în buteliile de scufundare ce trebuie umplute cu acest amestec la presiunea de 200 bar (sc. man.). Prepararea acestui amestec se face în două etape:

– în prima etapă se fabrică amestecul primar NITROX 40/60 din oxigen şi aer în buteliile tampon la 250 bar (sc. man.), conform procedurii de la paragraful 4.4.1.2, ecuația corespunzătoare fiind:

$$250 \cdot 0{,}6 = (250 \cdot x) \cdot 0 + x \cdot 0{,}79,$$

de unde rezultă $x \cong 190$ bar (sc. man.); prin urmare, amestecul NITROX 40/60 la 250 bar (sc. man.) se prepară astfel: se presurizează buteliile tampon mai întâi cu oxigen pur livrat din buteliile de oxigen până când presiunea din buteliile tampon devine 250 – 190 = 60 bar (sc. man.), după care, cu ajutorul compresorului de aer se continuă presurizarea cu încă 190 bar cu aer comprimat, până când presiunea amestecului din buteliile tampon devine egală cu 250 bar (sc. man.); astfel, s-a obținut în buteliile tampon un amestec primar NITROX 40/60, la presiunea de 250 bar (sc. man.); această primă serie de operațiuni se va relua de fiecare dată când este necesar să se obțină o rezervă suficientă de NITROX 40/60 la o presiune superioară presiunii de 150 bar (sc. man.), caz limită de umplere cu NITROX a buteliilor de scufundare;

– în a doua etapă, se prepară amestecul NITROX definitiv în buteliile de scufundare la procentajul de oxigen dorit, pornind la amestecul NITROX primar; pentru exemplificare se prezintă cazul în care se doreşte prepararea unui amestec NITROX 30/70 (30% oxigen şi 70% azot) la presiunea de 200 bar (sc. man.), în buteliile de scufundare, prin corectarea amestecului NITROX 40/60 cu aer comprimat furnizat de compresor; procedura este cea arătată la paragraful 4.5.4, privind corectarea unui amestec NITROX prea bogat în oxigen, ecuația caracteristică fiind:

$$200 \cdot 0{,}30 = (200 - x) \cdot 0{,}21 + x \cdot 0{,}40,$$

de unde rezultă $x \cong 95$ bar (sc. man.); prin urmare, pentru fabricarea amestecului NITROX 30/70 la 200 bar (sc. man.), se presurizează butelia de scufundare cu amestec NITROX 40/60 din buteliile tampon, până când presiunea din butelia de scufundare devine egală cu 95 bar (sc. man.), după care, cu ajutorul compresorului se injectează în butelia de scufundare 200 – 95 = 105 bar aer comprimat, până când presiunea din butelia de scufundare devine egală cu 200 bar (sc. man.); astfel, în butelia de scufundare s-a obținut un amestec NITROX 30/70 la presiunea dorită de 200 bar (sc. man.).

Cu aceeaşi instalație, se pot prepara şi amestecuri NITROX la un procentaj de oxigen superior lui 40% (în acest caz, toată instalația şi buteliile de scufundare trebuie degresate). Astfel, este suficient de a injecta în buteliile de scufundare oxigen pur din buteliile de oxigen şi apoi de a completa, prin injectare de amestec primar NITROX 40/60, până la presiunea dorită, urmând procedura de corectare a unui amestec NITROX prea sărac în oxigen prevăzută în paragraful 4.5.3.

Fiecare dintre circuite este echipat cu câte un *manometru cu clasă superioară* de precizie, pentru a se asigura prepararea unui amestec cu concentrație volumică de oxigen cât mai exactă. Tabloul de manevră şi control mai este echipat cu un *manodetentor* şi cu un *analizor de oxigen* care permite controlarea amestecului preparat în fiecare butelie de scufundare. De asemenea, se mai poate utiliza un analizor de mână ce poate fi branşat la ieşirea fiecăreia dintre buteliile de scufundare. În cazul în care analizorul de oxigen este integrat tabloului de manevră şi control, trebuie purjat circuitul de analiză pentru fiecare butelie controlată.

Pentru prepararea locală de amestecuri respiratorii binare sau ternare se pot utiliza instalații portabile (fig. 4.17) de mici dimensiuni care cuprind un *tablou de control* de mici dimensiuni sub forma unei valize, prevăzut cu trei branşamente: primul este pentru intrare oxigen pur de la o *butelie de oxigen medical*, al doilea este pentru intrare aer comprimat de la un *compresor portabil* şi al treilea pentru ieşire gaze către *butelia de scufundare*. Fiecare circuit este echipat cu câte un manometru, umplerea buteliei de scufundare fiind reglată printr-un manometru de precizie, de preferință digital.

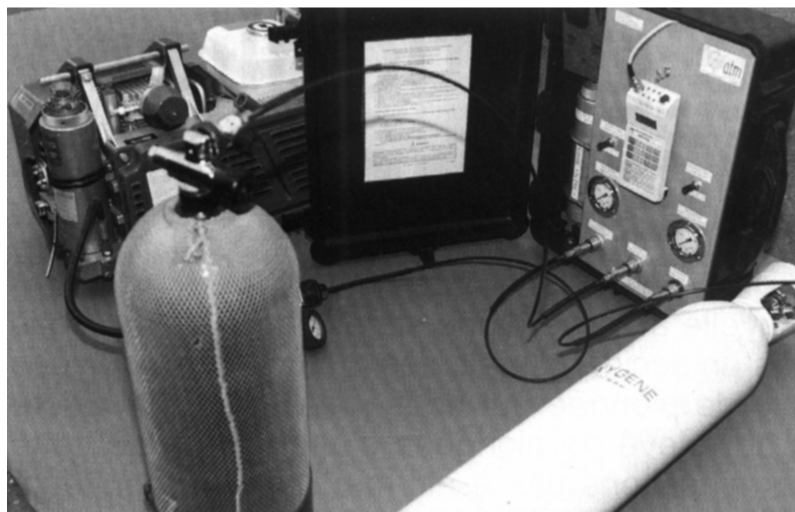


Fig. 4.17. Instalație portabilă pentru prepararea locală a amestecurilor respiratorii.

Pentru prepararea de amestecuri respiratorii binare sau ternare în cantitate mare şi foarte mare care să asigure stocaje importante de amestecuri pentru scufundări colective în sisteme hiperbare specializate, se vor utiliza *instalații de fabricare a amestecurilor respiratorii de mari dimensiuni* aşa cum este cea prezentată în figura 4.18.



Fig. 4.18. Instalație pentru prepararea unor cantități mari de amestecuri respiratorii.

4.7. OMOGENIZAREA AMESTECURILOR DE GAZE

La fabricarea amestecurilor respiratorii o problemă deosebit de importantă o reprezintă omogenizarea amestecului de gaze, care se produce, pe de o parte, prin fenomenul de difuzie moleculară şi, pe de altă parte, prin fenomenul de difuzie turbulentă specifică turbulenței jetului creat la injecția gazului în recipientul cu amestec. Ținând cont de teoriile din literatura de specialitate, se poate spune că difuzia unui gaz este cu atât mai mare cu cât viteza şi traiectoria liberă a moleculelor sunt mai mari.

În tabelul 4.11 sunt prezentați coeficienții de difuzie ai câtorva gaze din aer la temperatura de 0^0C.

Tabelul 4.11

Coeficienții de difuzie ai câtorva gaze din aer la 0^0C

Gaz	Coeficienții de difuzie [cm^2/s]	Observații
CO_2	0,139	Winkelmann
H_2	0,634	Obermayer
O_2	0,178	Obermayer

Din experiențele efectuate de Alfred Taylor rezultă că omogenizarea, în condiții de repaus, a unui amestec care conține 25% CO_2 (r_{CO_2} =0,25) şi care a rezultat prin injectarea bioxidului de cabon într-un recipient cu argon, are loc după aproximativ 45 de zile. În prezent, cea mai folosită tehnică de omogenizare a amestecurilor de gaze este agitația mecanică (rotirea buteliei). În aceste noi condiții, la o turație de 10 până la 20 rot/min, omogenizarea amestecului argon-dioxid de carbon (r_{Ar} =0,75, r_{CO_2} =0,25), prezentat mai sus, are loc în 1,5 ore. Metoda agitației mecanice este obligatorie când se execută amestecuri în volume mici.

Făcând apel la legile care guvernează amestecarea gazelor sub presiune, trebuie menționate două probleme importante. Astfel, în timpul compresiei temperatura gazului în recipient creşte şi cu cât viteza compresiei este mai mare cu atât temperatura gazului este mai mare. În acest caz masa de gaz introdusă în recipient este mai mică decât în cazul în care procesul ar fi izotermic. În astfel de situații, pentru amestecurile realizate cu urmărirea presiunii din recipient, este interzisă efectuarea unor corecții ulterioare. Chiar şi în cazul unor procese izotermice pot apărea neconcordanțe datorită faptului că gazele nu sunt perfecte. Totuşi, abaterile sunt neglijabile atunci când amestecarea gazelor are loc la temperatura camerei şi la presiuni relativ mici (vezi procesele de compresie pe timpul scufundărilor în saturație când amestecarea gazelor este locală, având loc chiar pe timpul procesului compresiei). Abaterile nu sunt neglijabile atunci când procesul de amestecare are loc la presiuni mari şi în recipienți cu volume mici.

4.8. ÎNLOCUIREA AMESTECURILOR RESPIRATORII

Când azotul din gazul respirat este înlocuit cu heliu, acesta din urmă este absorbit de plămâni şi simultan azotul este eliminat. Între alveole şi sânge şi între sânge şi țesuturile organismului are loc o difuzie în contracurent a gazelor. Amestecul respirator HELIOX poate fi respirat timp îndelungat, fără ca organismul să fie afectat. În acest timp, organismul se saturează cu heliu şi țesuturile sale sunt spălate complet de azot.

Neonul nu este mai uşor decât azotul, dar este mai solubil decât heliul. Argonul este nepotrivit pentru a înlocui azotul din cauza solubilității sale mari în soluții apoase sau grăsimi.

În practică se foloseşte metoda schimbării amestecurilor respiratorii chiar pe timpul decompresiei. Spre exemplu, în cazul decompresiei după o scufundare cu amestec respirator HELIOX, decompresie îngreunată de numeroase accidente osteo-articulare, se recomandă ca de la 10 m adâncime, spre suprafață, să se înlocuiască amestecul HELIOX cu aer. Această înlocuire avantajează desaturarea mai rapidă a țesuturilor de gazul inert care inițial a fost heliul. Prin urmare, schimbarea amestecurilor respiratorii favorizează executarea mai rapidă a decompresiei.

Un exemplu edificator în ceea ce priveşte înlocuirea amestecurilor respiratorii pentru scurtarea decompresiei, este reprezentat în figura 4.19. Se observă diferențe foarte mari, funcție de amestecurile respiratorii utilizate, micşorându-se decompresia de la aproximativ 316 minute la numai 35 minute. Se consideră o scufundare cu amestec respirator HELIOX la adâncimea de 30 m [4 bar (sc. abs.) = 400 KPa (sc. abs.)] cu durata lucrului în imersiune de 120 minute. Dacă decompresia s-ar executa cu acelaşi amestec respirator HELIOX, durata acesteia va fi de 316 minute. Dacă se schimbă amestecul respirator la primul palier de decompresie cu aer, durata decompresiei se reduce la 170 minute. Dacă în loc de aer se respiră oxigen pur, decompresia se reduce la 83 minute. Cea mai rapidă decompresie se obține dacă se schimbă amestecul HELIOX cu aer, după 45 minute de la începerea scufundării, iar la decompresie se respiră oxigen încă de la primul palier. În acest caz decompresia va dura numai 35 minute.

Acest sistem de revenire rapidă la presiunea atmosferică se practică numai în cazuri de strictă necesitate, când asupra scafandrului este obligatorie o intervenție de securitate la presiunea atmosferică.

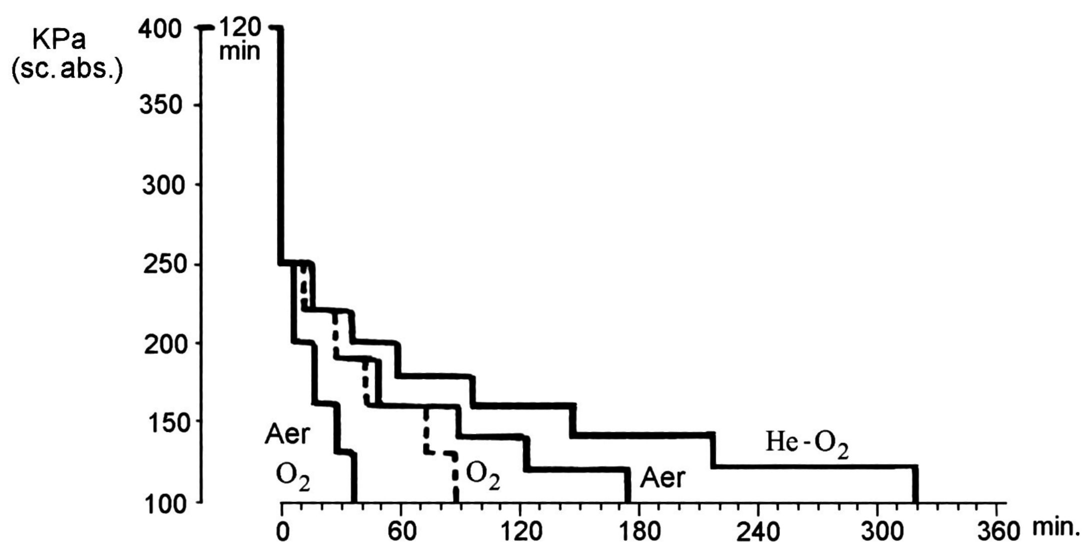


Fig. 4.19. Profilul decompresiei după o scufundare cu amestec HELIOX timp de 120 min., utilizând diferite amestecuri respiratorii (după A. A. Bühlmann).

4.9. EFECTELE OXIGENULUI DIN AMESTECURILE RESPIRATORII

Limitele impuse de oxigen în scufundare, au fost determinate experimental şi sunt prezentate grafic în figura 4.20.

Pe abscisă este reprezentată adâncimea de scufundare, în metri şi presiunea corespunzătoare adâncimii, în bar (sc. abs.), iar pe ordonată, concentraţia oxigenului (%O_2) şi concentraţia gazului inert (% gaz inert) în amestec. Curba I reuneşte punctele a căror presiune parţială a oxigenului este p_{O_2} = 0,17 bar (sc. abs.), curba II punctele a căror presiune parţială a oxigenului este p_{O_2} = 2 bar (sc. abs.), iar curba reprezentată cu linie întreruptă punctele a căror presiune parţială a oxigenului este p_{O_2} = 0,21 bar (sc. abs.). Curba I reprezintă curba limită inferioară a zonei de securitate, sub această curbă existând zona de hipoxie şi anoxie, curba II reprezintă curba limită superioară a zonei de securitate, peste această curbă existând zona de hiperoxie, iar curba desenată cu linie întreruptă este curba de normoxie corespunzătoare unei presiuni parţiale a oxigenului p_{O_2} = 0,21 bar (sc. abs.) egală cu cea a oxigenului din aerul la presiunea atmosferică. Înainte de a face comentarii asupra graficului din figura 4.20 este necesar să se precizeze importanţa factorului timp în apariţia accidentelor datorate deficitului de oxigen (hipoxie) şi lipsei de oxigen (anoxie) sau presiunii în exces a acestuia (hiperoxie).

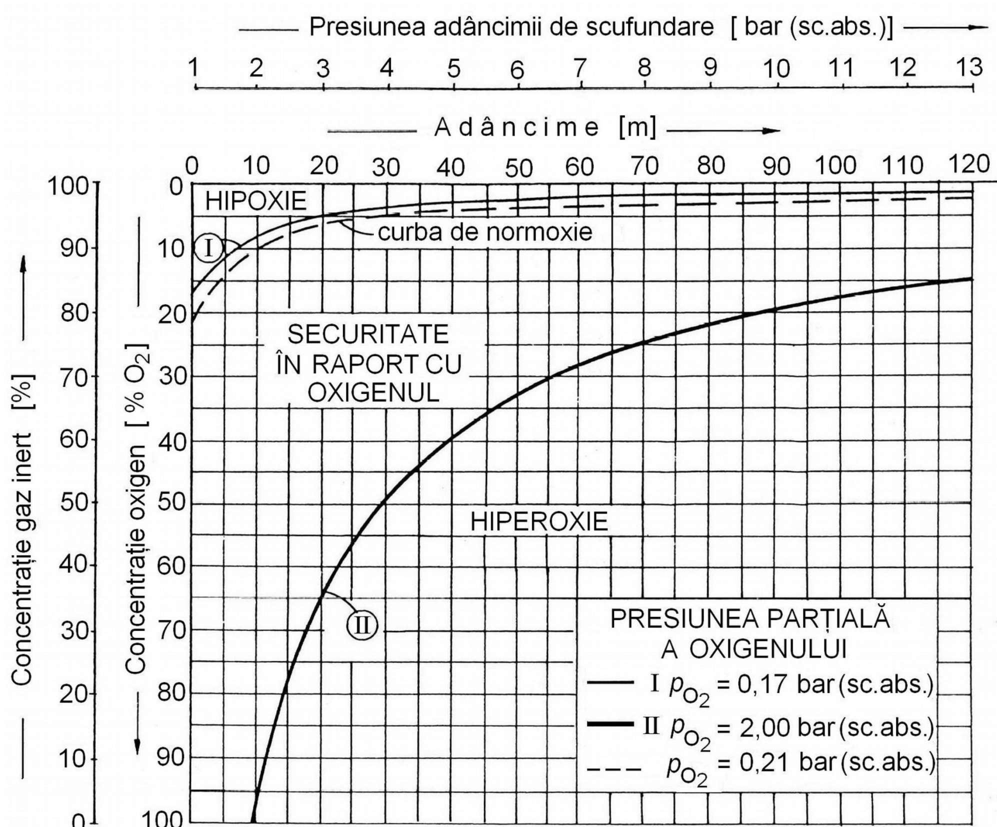


Fig. 4.20. Reprezentarea grafică a limitelor impuse pentru oxigen în amestecurile respiratorii.

Respirând un amestec cu presiunea parţială a oxigenului sub valoarea corespunzătoare curbei I (p_{O_2} < 0,17 bar (sc. abs.)) se riscă o sincopă hipoxică sau anoxică, ce apare fără nici un semnal de avertizare. Timpul de latenţă este 1…2 minute, funcţie de activitatea desfăşurată sub apă. Pot apărea însă semnale de alarmă în zona presiunilor parţiale ale oxigenului cuprinse între 0,17 bar (sc. abs.) şi 0,1 bar (sc. abs.), dar aceste semnale nu sunt întotdeauna percepute de scafandri şi deci, nu se poate pune bază pe acestea ca elemente de stabilire a începutului unei crize de hipoxie.

În continuare, se prezintă efectele presiunii parţiale a oxigenului, p_{O_2} , în cazul hipoxiei:

– p_{O_2} < 0,17 bar (sc. abs.): pulsul şi frecvenţa respiraţiei cresc, atenţia scade, mişcările delicate diminuează;
– $p_{O_2} \leq$ 0,1 bar (sc. abs.): judecată eronată, insensibilitate, oboseală, apariţia cianozei;
– p_{O_2} = 0,06…0,07 bar (sc. abs.): greaţă, vomă, imposibilitate de efort, cianoză intensă;
– p_{O_2} < 0,06 bar (sc. abs.): respiraţie neregulată, convulsii, sincopă, moarte.

Respirând un amestec cu presiunea parţială a oxigenului peste valoarea corespunzătoare curbei II (p_{O_2} > 2 bar (sc. abs.)) se riscă o criză convulsivă de tip hiperoxic. Această criză nu apare imediat ce s-a depăşit pragul critic, ea producându-se dacă expunerea se prelungeşte peste anumite limite de timp, care definesc latenţa fenomenului. Latenţa variază de la individ la individ sau chiar la acelaşi individ funcţie de efortul depus, frig, oboseală etc. După U.S. Navy Diving Manual, timpii de latenţă la respirarea oxigenului pur, sunt:

– 7 ore la 7 metri adâncime (p_{O_2} = 1,7 bar (sc. abs.));
– 3 ore la 8 metri (p_{O_2} = 1,8 bar (sc. abs.));
– 50 minute la 10 metri (p_{O_2} = 2 bar (sc. abs.));
– 30 minute la 20 metri (p_{O_2} = 3 bar (sc. abs.));
– 10 minute la 25 metri (p_{O_2} = 3,5 bar (sc. abs.)).

Activitatea în mediul marin scurtează timpul de latenţă. Astfel, pentru adâncimea de 18 m, în incinte hiperbare uscate (barocamere), timpul de latenţă poate ajunge până la 2 ore, iar în mediul marin el este de numai 40 minute. Pentru exemplificare, în figura 4.21 se prezintă curbele aproximative ale timpilor de latenţă ce preced criza convulsivă neurotoxică, funcţie de adâncime, pentru cazul în care se respiră oxigen pur.

Variaţiile individuale ale timpului de latenţă sunt, de asemenea, foarte întinse şi imprevizibile. La acelaşi individ, timpul de latenţă poate fi cuprins între 7 minute şi 2,5 ore. Semnele de alarmă iau aspectul unor mici crize foarte localizate, cu durată scurtă, greţuri, indispoziţii, tremur al buzelor sau muşchilor feţei, crampe musculare, jenă respiratorie, accelerarea pulsului şi palpitaţii. Apoi, totul reintră în normal până la o nouă criză respiratorie. Astfel, pot apărea mai multe crize mici până la marea criză convulsivă. Acest efect neurotoxic al oxigenului a fost descris pentru prima dată de

Paul Bert în anul 1878. Câțiva ani mai tărziu, în 1899, Lorrain Smith a arătat că oxigenul inhalat în mod continuu şi timp îndelungat, provoacă leziuni pulmonare chiar şi la presiunea atmosferică. Primul efect, *efectul Paul Bert*, interesează scafandrii autonomi ce folosesc aparate cu oxigen pur sau cu amestecuri supraoxigenate, iar cel de-al doilea efect, *efectul Lorrain Smith*, interesează scafandrii ce staționează timp îndelungat în incinte hiperbare supraoxigenate, cum este cazul scafandrilor aflați în saturație, sau al tratamentelor prin oxigenoterapie hiperbară.

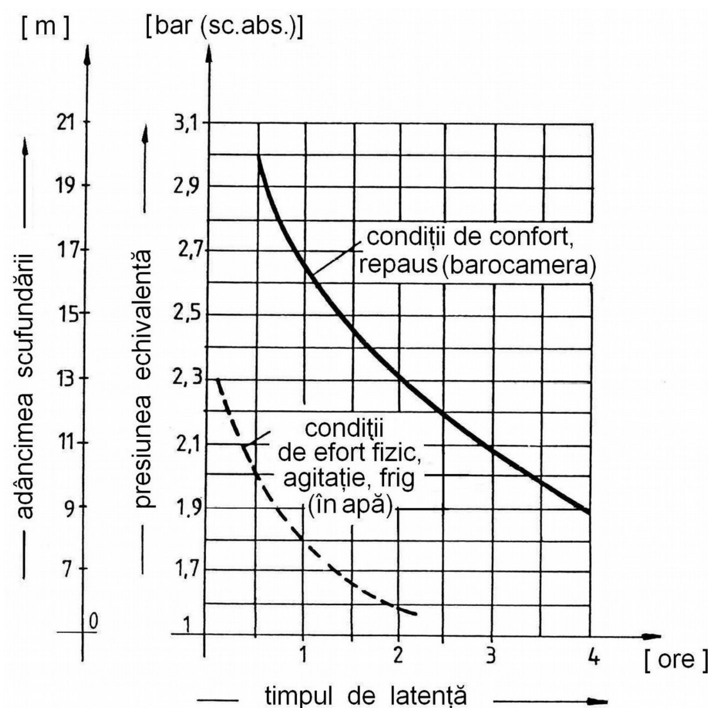


Fig. 4.21. Curbele aproximative ale timpilor de latență ce preced criza convulsivă neurotoxică, funcție de adâncimea scufundării (sau de presiunea echivalentă).

Limitele de securitate pentru utilizarea oxigenului pur, recomandate în urma experimentărilor sunt:

- în scufundări unitare reale: 6,5...7 m adâncime (p_{O_2} = 1,65…1,7 bar (sc. abs.));
- la paliere de decompresie în apă: 6 m adâncime (p_{O_2} = 1,6 bar (sc. abs.));
- la paliere de decompresie în turele de sufundare sau în barocamere: 12 m adâncime (p_{O_2} = 2,2 bar (sc. abs.));
- în tratamentul accidentelor de scufundare: 9 m adâncime (p_{O_2} = 1,9 bar (sc. abs.)); în acest caz, cea mai bună combinație este 25 minute oxigen şi 5 minute aer sau alt amestec oxigen-gaz inert;
- la testele de aptitudine în stabilirea toleranței la oxigenul hiperbar: 18 m adâncime (p_{O_2} = 2,8 bar (sc. abs.)); la scafandri de luptă, cei mai expuşi dintre scafandri la hiperoxie, se recomandă ca testul să se efectueze la adâncimea de 20 m (p_{O_2} = 3 bar (sc. abs.)) cu urmărirea răspunsului pe electroencefalogramă.

În cazul scufundărilor cu amestecuri respiratorii sintetice sau cu aer, presiunea parțială a oxigenului se va menține în limitele maxime admisibile de 1,2...1,6 bar (sc. abs.). Cu alte cuvinte, aerul atmosferic poate fi folosit, din punct de vedere al toxicității oxigenului, în condiții de securitate deplină până la adâncimea de 75 m. În realitate, la scufundarea cu aer, această adâncime nu poate fi atinsă decât de profesioniști antrenați, datorită limitei impuse de narcoza cu azot (50...60 m). După unii autori, pentru durată limitată, presiunea parțială a oxigenului de 2 bar (sc. abs.) într-un amestec respirator este foarte bine suportată de scafandri.

Tabelul 4.12

Valori limită ale timpului de expunere a scafandrului la diferitele presiuni parțiale ale oxigenului în cazul scufundărilor autonome cu oxigen pur și cu amestec NITROX

Limitele de utilizare a oxigenului pur U.S.Navy			Limitele de utilizare a amestecului NITROX U.S.Navy		Limitele de expunere pentru scufundări cu amestec NITROX NOAA		
p_{O_2} [bar(sc.abs.)]	Adâncime [m]	Durata maximă [min]	p_{O_2} [bar(sc.abs.)]	Durata maximă [min]	p_{O_2} [bar(sc.abs.)]	Durata maximă pentru o singură scufundare pe zi [min]	Durata maximă pentru mai multe scufundări pe zi [min]
Expuneri normale							
					0,6	720	720
					0,7	570	570
					0,8	450	450
					0,9	360	360
			1,0	240	1,0	300	300
			1,1	120	1,1	240	270
			1,2	80	1,2	210	240
1,3	3	240	1,3	60	1,3	180	210
			1,4	50	1,4	150	180
1,45	4,5	120					
			1,5	40	1,5	120	180
			1,6	30	1,6	45	150
1,7	7	90					
1,85	8,5	65					
Expuneri excepționale							
			1,3	240	1,3	240	
			1,4	180	1,4	180	
			1,5	120	1,5	150	
			1,6	100	1,6	120	
			1,7	80	1,7	75	
			1,8	60	1,8	60	
1,9	9	45					
2,05	10,5	34					
2,2	12	25					
2,35	13,5	15					

Pentru scafandrii militari, de incursiune şi deminori, care utilizează de obicei aparate de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen pur sau aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis cu amestec NITROX, au fost propuse o serie de limite de timp practice privind utilizarea oxigenului pur sau a amestecului binar NITROX de către U. S. Navy sau de către **NOAA** (**N**ational **O**ceanic and **A**tmospheric **A**dministration). Aceste valori limită de expunere funcție de presiunea parțială a oxigenului p_{O_2} sunt prezentate comparativ în tabelul 4.12.

Din prezentarea comparativă a limitelor de timp privind expunerea la oxigen a scafandrilor militari autonomi respirând oxigen pur sau amestecuri NITROX (tab. 4.12), rezultă diferențele importante între valorile impuse de diferitele şcoli şi deci marele grad de incertitudine inerentă studiilor privind expunerea scafandrului la oxigen.

În cazul scufundărilor care necesită staționarea îndelungată a scafandrilor într-o ambianță cu presiunea parțială a oxigenului ridicată, problema se pune diferit, ținând cont de *efectul Lorrain Smith*. Intoxicația pulmonară a oxigenului descrisă de Lorrain Smith în 1897 sub numele de *pneumonie cauzată de oxigen* trece foarte rapid prin mai multe faze de gravitate până la edem pulmonar. Aceasta este o intoxicație cronică ale cărei prime simptome, absolut benigne, nu apar decât după un interval de timp mai mare şi la o presiune parțială a oxigenului de peste 0,5 bar (sc. abs.). Spre exemplu, pentru un scafandru care respiră oxigen pur (r_{O_2} = 1) la adâncimea de 10 m (p_{O_2} = 2 bar (sc. abs.)) evoluția semnelor şi simptomelor *pneumoniei* este următoarea:

- după aproximativ 4 ore: jenă respiratorie;
- după aproximativ 6 ore: jenă respiratorie netă şi tuse;
- după aproximativ 8 ore: arsuri retrosternale;
- după aproximativ 9 ore: arsuri şi tuse cu frecvență mărită.

În anul 1971 Clark şi Lambertsen au propus cuantificarea dozei de toxicitate a oxigenului respirat cu ajutorul unei unități toxice cumulative **UPTD** (**U**nit **P**ulmonary **T**oxicity **D**ose):

$$\mathrm{UPTD} = \sqrt[-1{,}2]{\frac{0{,}5}{p_{O_2} - 0{,}5}}\, t = t\,(2 \cdot p_{O_2} - 1)^{0{,}833}, \qquad (4\text{-}20)$$

unde:

t este timpul de expunere la oxigenul hiperbar (min);

p_{O_2} – presiunea parțială a oxigenului din amestecul respirator (bar (sc. abs.)).

Trebuie menționat faptul că în cazul utilizării oxigenului pur, presiunea parțială a oxigenului este chiar presiunea totală a gazului pur.

Clark şi Lambertsen au demonstrat că oxigenul hiperbar are influență asupra capacității vitale micşorând-o, la 50% din subiecți, cu până la 20%, funcție de timpul de expunere. Variația capacității vitale funcție de UPTD este prezentată în tabelul 4.13.

În cazul scufundărilor în saturație cu un UPTD = 1900...2200, nu apar modificări semnificative ale capacității vitale, doza fiind considerată ca admisibilă.

Relația stabilită de Clark şi Lambertsen este satisfăcătoare când presiunea parțială a oxigenului, p_{O_2}, este constantă şi depăşeşte 1 bar (sc. abs.) (*Lemaire*, 1977).

Pentru expuneri la valori variabile ale presiunii parțiale a oxigenului, fie expuneri cu întreruperi, fie expuneri de nivel scăzut cuprinse între 0,5 şi 0,8 bar (sc. abs.), dar pentru durate lungi, cuantificarea propusă de Clark şi Lambertsen nu este cea mai concludentă, afirmație demonstrată pentru scufundări în saturație cu p_{O_2} de 0,6 bar (sc. abs.) timp de 5 până la 6 zile, ceea ce au corespuns unui UPTD de 1900 până la 2200 unități fără ca să apară la scafandri modificări ale capacității vitale (*Sciarli* şi *Lemaire*, 1975).

Tabelul 4.13

Variația capacității vitale la 50% din subiecți, funcție de UPTD (după *Clark*, 1970)

UPTD	Variația capacității vitale [%]
615	-2
825	-4
1035	-6
1230	-8
1425	-10
1815	-15
2190	-20

Ținând cont de variațiile capacității vitale, de simptomele apărute şi de faptul că în timpul decompresiei presiunea parțială a oxigenului este destul de aproape de limita toxică, 0,6 bar (sc. abs.), sau de faptul că aceasta poate varia, şcoala franceză de scufundare a renunțat la cuantificarea lui Clark şi Lambertsen. După Lemaire (1977), cuantificarea dozei de toxicitate a oxigenului respirat se determină cu formula:

$$U_2 = (p_{O_2})^2 t, \quad (4\text{-}21)$$

unde:

t este timpul de expunere la oxigenul hiperbar (ore);

p_{O_2} – presiunea oxigenului pur sau presiunea parțială a oxigenului din amestecul respirator (bar (sc. abs.)).

Determinarea efectului toxic cumulativ al oxigenului nu se poate face decât dacă presiunea lui parțială depăşeşte 0,5 bar (sc. abs.). Pe timpul expunerilor la amestecuri supraoxigenate, după Lemaire (1977), se pot atinge valori de 30 U_2 până la 36 U_2, funcție de subiecți, fără să apară diminuarea capacității vitale sau a simptomelor specifice pneumoniei.

Revenind la limitele de securitate ale presiunii parțiale a oxigenului, în cazul scufundărilor cu expuneri de lungă durată, în ambianță hiperbară, se poate preciza:

- presiunea parțială a oxigenului la nivelul de viață: 300...400 mbar (sc. abs.), adică 0,3...0,45 bar (sc. abs.);
- presiunea parțială a oxigenului pe timpul decompresiei: mai mare de 500 mbar (sc. abs.), adică 0,5 bar (sc. abs.), dar astfel încât să nu se depăşească doza de toxicitate.

Experiențele efectuate în cadrul Laboratorului Hiperbar din cadrul Centrului de Scafandri Constanța pentru punerea în evidență a modificării capacității vitale pulmonare la diferitele doze cumulative de oxigen hiperbar (UPTD) sunt prezentate în

tabelele 4.14 şi 4.15. Au fost efectuate experimentări pe timpul decompresiilor după scufundări de lungă durată cu amestecuri respiratorii NITROX (12 subiecți) şi HELIOX (24 subiecți) în care presiunea parțială a oxigenului a fost de 0,61 bar (sc. abs.)), cu ajutorul unui expirograf tip MEDICOR. În tabelele 4.14 si 4.15 sunt prezentate variațiile capacității vitale relative față de măsurătorile efectuate la presiunea atmosferică, la diferite doze cumulative cu oxigen hiperbar.

Tabelul 4.14

Variația capacității vitale relative [%] față de măsurătorile efectuate la presiunea atmosferică, pentru diferite doze cumulative cu oxigen hiperbar inhalat (UPTD) pe timpul decompresiilor după scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii NITROX
(după *Laboratorul Hiperbar din Constanța*)

Subiecți	UPTD = 577	UPTD = 847	UPTD = 1404	Caracteristicile scufundării
PA AM BM RM	+ 5,4 0 + 1,9 + 9,2			– adâncimea scufundării 25 m; – 34 ore cu presiunea parțială a oxigenului în amestecul respirator de 0,61 bar (sc. abs.)
MM BD MA SI		– 6,2 + 3,8 +11,0 – 2,6		– adâncimea scufundării 41 m; – 50 ore cu presiunea parțială a oxigenului în amestecul respirator de 0,62 bar (sc. abs.)
PA MI BM RM			– 5,6 +16,9 + 4,9 – 8,0	– adâncimea scufundării 50 m; – 82,7 ore cu presiunea parțială a oxigenului în amestecul respirator de 0,61 bar (sc. abs.)

Tabelul 4.15

Variația capacității vitale relative [%] față de măsurătorile efectuate la presiunea atmosferică, pentru diferite doze cumulative cu oxigen hiperbar inhalat (UPTD) pe timpul decompresiilor după scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii HELIOX
(după *Laboratorul Hiperbar din Constanța*)

a. *Scufundare la 180 m*. 84,6 ore cu presiunea parțială a oxigenului în amestecul respirator p_{O_2} = 0,61 bar (sc. abs.).

Subiecți	UPTD = 425	UPTD = 832
FR	– 10,1	– 9,8
BL	– 10,5	– 6,8
MA	– 16,5	– 0,2
PM	– 4,3	– 3,9

b. *Scufundare la 190 m.* 111,2 ore cu presiunea parțială a oxigenului în amestecul respirator p_{O_2} = 0,61 bar (sc. abs.).

Subiecți	UPTD = 425	UPTD = 1053	UPTD = 1888
GG	– 6,6	– 2,2	– 0,9
ZC	– 10,9	– 7,1	– 5,6
SM	+ 11,2	+ 19,0	+ 3,3
DO	– 5,9	– 5,6	– 2,2

Tabelul 4.15 (continuare)

c. *Scufundări la 200 m şi 350 m*. 100 ore cu presiunea parţială a oxigenului în amestecul respirator p_{O_2} = 0,61 bar (sc. abs.), respectiv 161 ore cu presiunea parţială a oxigenului în amestecul respirator p_{O_2} = 0,51 bar (sc. abs.)

Subiecţi	UPTD = 1698
AD	+ 2,6
FC	+ 6,8
HP	– 1,9
AC	– 1,7

Subiecţi	UPTD = 367
CM	– 10,6
NV	– 20,1
MM	– 2,8
BD	+ 2,9

d. *Scufundare la 450 m.* 175 ore cu presiunea parţială a oxigenului în amestecul respirator p_{O_2} cuprinsă între 0,51 bar (sc. abs.) şi 0,61 bar (sc. abs.)

Subiecţi	UPTD = 42	UPTD = 94	UPTD = 198	UPTD = 415	UPTD = 848	UPTD = 1255	UPTD = 1655
RM	+ 0,2	– 0,5	– 4,2	+ 5,1	+ 8,2	+ 5,1	+ 0,6
CM	– 9,6	– 15,2	– 14,4	– 4,4	– 4,4	– 7,0	+ 2,3
PM	–15,9	– 10,6	– 4,3	– 13,0	– 4,3	– 4,3	– 1,1
MM	– 5,5	– 6,0	– 8,4	+ 0,5	– 2,5	– 2,5	+ 7,0

e. *Scufundare la 500 m*. 212,5 ore cu presiunea parţială a oxigenului în amestecul respirator p_{O_2} cuprinsă între 0,51 bar (sc. abs.) şi 0,61 bar (sc. abs.)

Subiecţi	UPTD = 11	UPTD = 43	UPTD = 68	UPTD = 96	UPTD = 123	UPTD = 155	UPTD = 176
FC	– 0,1		– 0,5	– 0,5	+ 4,9	0	+ 3,2
OG	– 12,3	+ 1,2	– 5,3	+ 6,5	+ 2,3	+ 9,5	– 4,7
MD	+ 5,1	+ 10,6	+ 11,3	+ 14,9	+ 15,7	+ 18,6	+ 17,8
NV	+ 6,9	– 0,8	+ 3,7	+ 9,5	+ 5,6	+ 1,2	+ 3,7

Subiecţi	UPTD = 205	UPTD = 233	UPTD = 260	UPTD = 376	UPTD = 597	UPTD = 1004	UPTD = 1190
FC	– 2,7	– 1,1	+ 6,0	+ 2,7	0	+ 2,2	– 8,1
OG	+ 4,1	+ 3,5	0	+ 1,2	+ 4,7	+ 5,3	+ 0,6
MD	+ 19,3	+ 17,1	+ 19,2	+ 20,7	+ 19,3	+ 14,2	+ 14,2
NV	+ 6,9	+ 6,9	+ 12,0	+ 5,0	+ 12,6	+ 11,4	+ 2,8

Subiecţi	UPTD = 1463	UPTD = 1615
FC	+ 3,8	– 0,1
OG	+ 2,4	– 1,8
MD	+ 21,4	+ 16,1
NV	+ 11,4	– 1,4

Datele obţinute în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanţa sunt suprapuse cu cele obţinute de Clark şi Lambertsen în figura 4.22. Se confirmă faptul că la

aproximativ 50% din numărul subiecților apare o reducere a capacității vitale pulmonare de până la 20%. Asupra variației capacității vitale relative trasată (fig. 4.22 – linie întreruptă) de Lambertsen, există unele rezerve. Capacitatea vitală suferă modificări şi la doze cumulative de oxigen hiperbar reduse, iar la doze mai mari modificările sunt mai mici decât cele constatate în gama 500...1500 unități UPTD. Acest fapt se poate pune pe seama unei adaptabilități la oxigenul hiperbar, adaptabilitate dovedită prin experimentările efectuate pe animale. Acesta este motivul pentru care echipa Laboratorului Hiperbar din Constanța a analizat datele obținute în încercarea de a răspunde la două probleme privind:

– influența gazului inert folosit ca diluant al oxigenului din amestecul respirat în condiții hiperbare;

– influența reducerii capacității vitale pulmonare la scafandri pe timpul revenirii la presiunea atmosferică.

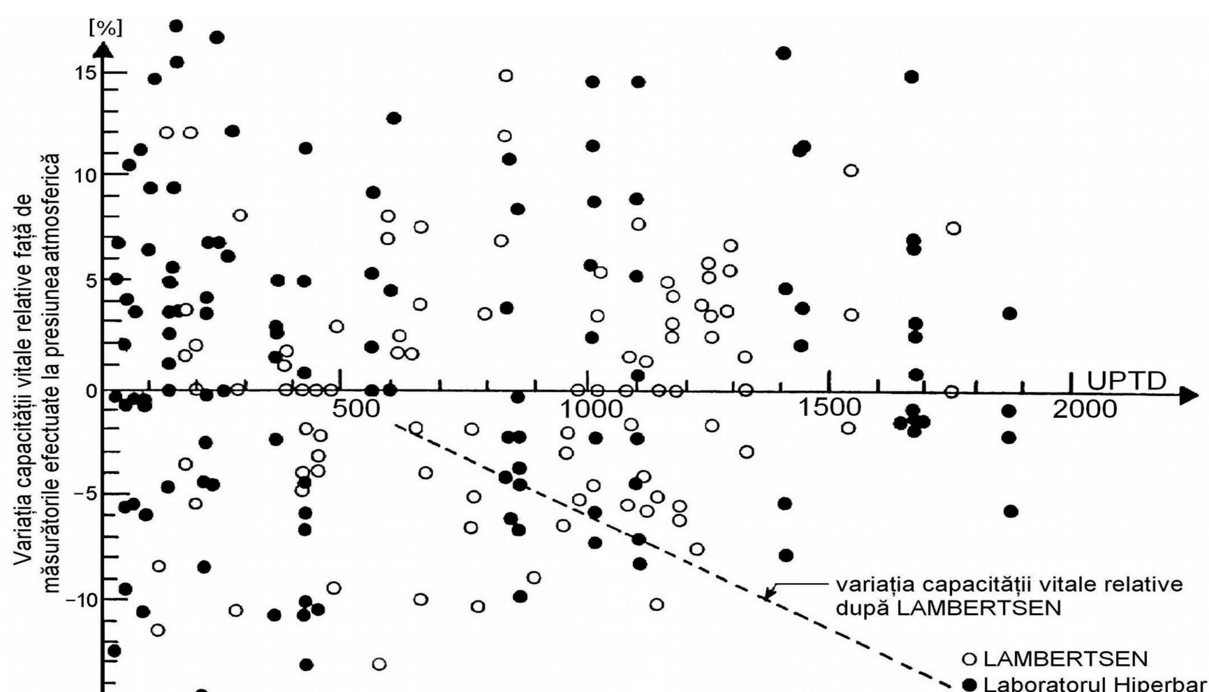


Fig. 4.22. Variația capacității vitale relative funcție de UPTD.

Ținând cont de faptul că analiza se face numai pentru subiecții care au suferit diminuări ale capacității vitale, pentru a răspunde la prima problemă, în figurile 4.23 şi 4.24 sunt prezentate variațiile capacității vitale relative în experimentările efectuate, în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța, cu amestecuri respiratorii NITROX şi respectiv HELIOX. Dacă pentru amestecurile respiratorii HELIOX (fig. 4.24) se confirmă rezultatele obținute de Clark şi Lambertsen, în cazul amestecurilor NITROX (fig. 4.23) se constată o mai bună adaptabilitate la oxigenul hiperbar. În acest caz, numai la 33% din numărul subiecților s-a constatat diminuarea capacității vitale cu până la 10%. Se poate aprecia că un amestec respirator NITROX supraoxigenat este mai bine tolerat de către scafandri.

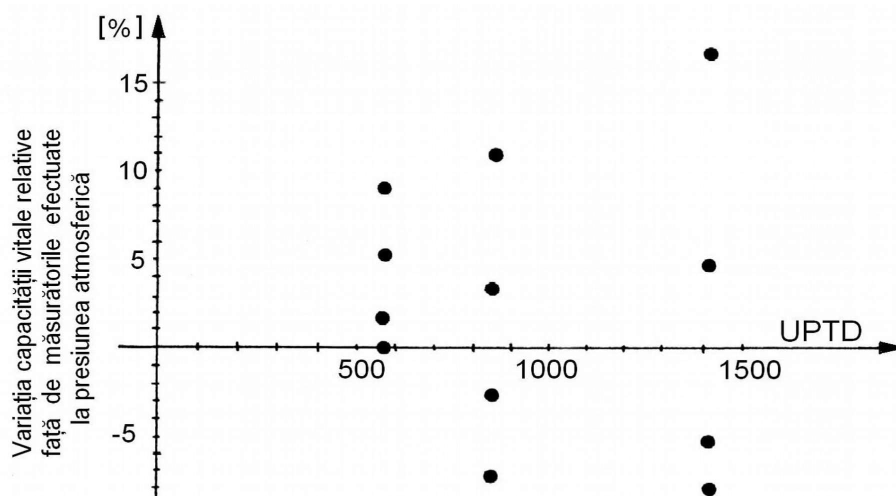


Fig. 4.23. Variația capacității vitale relative funcție de UPTD pe timpul decompresiilor după scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii NITROX.

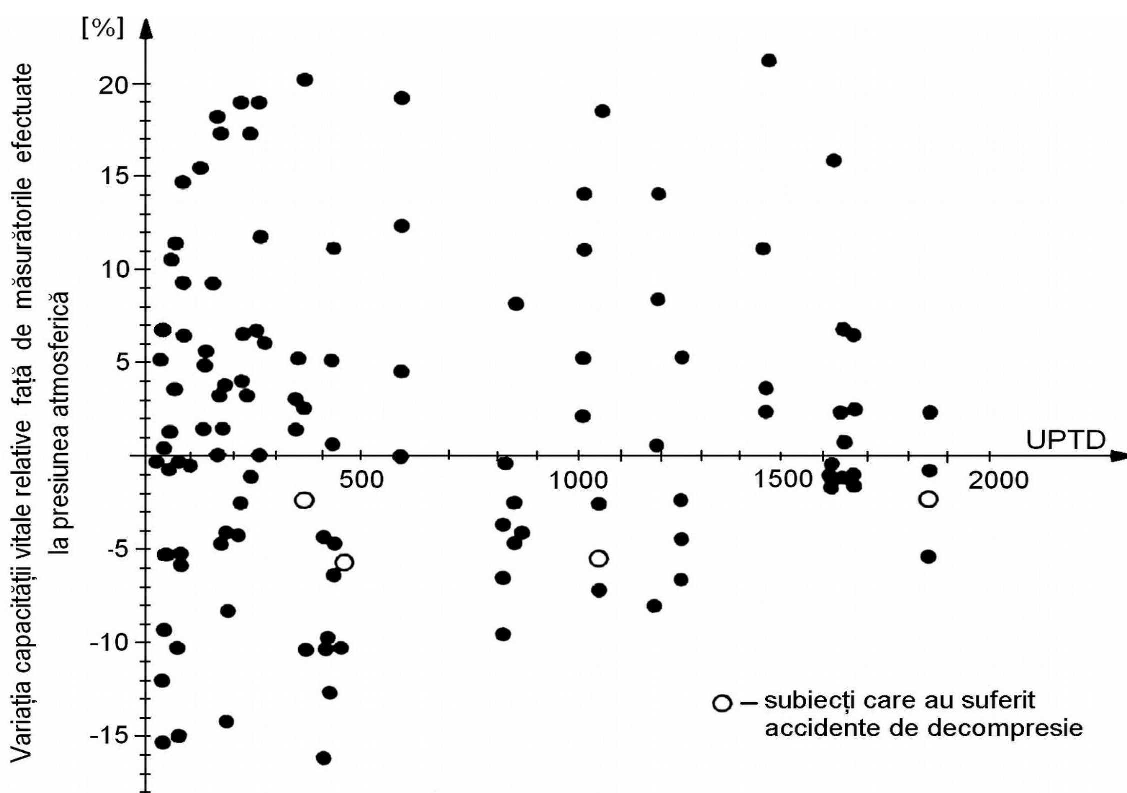


Fig. 4.24. Variația capacității vitale relative funcție de UPTD pe timpul decompresiilor după scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii HELIOX.

Referitor la influența reducerii capacității vitale pulmonare a scafandrilor pe timpul revenirii la presiunea atmosferică, s-au corelat rezultatele obținute cu incidența accidentelor de decompresie. S-a constatat că au apărut accidente de decompresie (fig. 4.24) numai la subiecții care au suferit diminuări ale capacității vitale. Din cei 24 subiecți investigați, la 9 subiecți (37,5%) s-a constatat o diminuare a capacității vitale, iar dintre aceştia 4 subiecți (45%) au suferit accidente de decompresie.

Cauzele accidentelor de decompresie se pun pe seama reducerii transportului de gaze inerte dizolvate în țesuturile organismului la expunerea în mediul hiperbar, dinspre

țesuturi spre exterior prin aparatul respirator, pe timpul revenirii la presiunea atmosferică, datorate efectului presiunii parțiale ridicate a oxigenului din amestecurile respiratorii asupra capacității vitale. Sensibilitatea subiecților la oxigen hiperbar poate fi o inaptitudine de scufundare, dar există şi posibilitatea "antrenării" organismului pentru creşterea rezistenței la efectele acestuia.

Pentru diminuarea efectelor oxigenului hiperbar s-au încercat, în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța, metode noi de abordare a problemei, făcându-se experimentări pe şobolani Wistar cu expuneri, în prealabil, la hipoxie urmate de expuneri la hiperoxie. Rezultatele experimentărilor au demonstrat o creştere a toleranței la oxigenul hiperbar, ceea ce a condus la ideea necesității efectuării unor recuperări fizice pentru scafandri în stațiuni montane cu altitudini până la 2000 m. Aceasta le conferă o creştere a toleranței la oxigenul hiperbar şi, implicit, o diminuare a modificărilor capacității lor vitale pe timpul expunerilor de lungă sau de scurtă durată în ambianțe hiperbare cu presiuni parțiale de oxigen ridicate.

Din cele prezentate mai sus se poate constata o tendință spre creşterea presiunii parțiale a oxigenului în amestecurile respiratorii către limitele maxime admisibile. Se pune, în mod firesc, întrebarea: de ce ar fi de dorit presiuni parțiale (concentrații) mari de oxigen în amestecurile respiratorii utilizate pentru scufundare?

Viteza de revenire la presiunea atmosferică după o scufundare, deci viteza decompresiei, este dictată, în mod direct, de timpul necesar eliminării gazului inert dizolvat, în țesuturile organismului uman, pe timpul lucrului sub presiune. Această cantitate de gaz inert dizolvată este funcție de presiunea parțială a acestuia în amestecul respirator. Deci, pentru o adâncime (presiune) dată, cu cât va fi mai mult oxigen în amestecul respirator cu atât cantitatea de gaz inert ce se va dizolva în țesuturi va fi mai mică şi, implicit, viteza de revenire la presiunea atmosferică poate fi mai mare. Spre exemplu, pentru o scufundare de o oră la 90 m adâncime, dacă amestecul HELIOX respirat pe timpul imersiei conține 2% oxigen ($r_{O_2}=0{,}02$), decompresia efectuată cu amestec cu 24% oxigen ($r_{O_2}=0{,}24$) va dura 15 ore şi 50 minute, iar dacă amestecul HELIOX respirat pe timpul imersiei conține 20% oxigen ($r_{O_2}=0{,}20$), decompresia efectuându-se cu amestec cu 24% oxigen ($r_{O_2}=0{,}24$), poate dura numai 10 ore şi 40 minute. Datele sunt prezentate în tabelul 4.16.

La fel de concludente sunt şi tabelele de decompresie calculate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța, după scufundări în care se utilizează amestecuri respiratorii NITROX supraoxigenate, conform datelor prezentate în tabelul 4.17 pentru o scufundare de 100 minute la adâncimea de 30 m. Se poate remarca scăderea considerabilă a timpului necesar pentru revenirea scafandrului la presiunea atmosferică în cazul utilizării amestecurilor NITROX supraoxigenate comparativ cu utilizarea aerului comprimat. Acesta este motivul pentru care scufundarea cu amestecuri supraoxigenate a căpătat o largă aplicabilitate în operațiuni cu caracter militar.

Tabelul 4.16

Comparaţie între duratele decompresiilor pe timpul cărora s-au folosit amestecuri respiratorii HELIOX cu concentraţii diferite de oxigen

Scufundare de 1 oră la adâncimea de 90 m				
Amestec respirator de lucru	2/98[1]			20/80
Amestec respirator la decompresie	12/88	24/76	36/64	24/76
Durata totală a decompresiei (ore.minute)	20.30	15.50	12.30	10.40

[1] Rapoartele de acest gen se vor citi: 2% O_2 şi 98% He.

Tabelul 4.17

Comparaţie între duratele decompresiilor pe timpul cărora s-au folosit amestecuri respiratorii NITROX supraoxigenate şi aer

Scufundare de 100 minute la adâncimea de 30 m				
Amestec respirator la decompresie	Aer	NITROX		
		30% O_2	40% O_2	50% O_2
Durata totală a decompresiei (minute)	88,4	45,6	20,8	2,8

4.10. EFECTELE GAZELOR INERTE DIN AMESTECURILE RESPIRATORII

Indiferent de gazul inert utilizat ca diluant al oxigenului, unul dintre marile neajunsuri ale acestuia este efectul narcotic pe care îl induce. Se admite, în prezent, că acţiunea fiziologică a unui amestec respirator depinde de compoziţia sa, de concentraţia constituenţilor şi de presiunea la care este respirat. Ultimii doi factori, corelaţi cu acţiunea fiziologică a unui amestec respirator, determină presiunea maximă admisă pentru gazul inert astfel încât efectul narcotic al acestuia să nu-şi facă apariţia.

Narcoza este caracterizată de un ansamblu de perturbaţii ale comportamentului, judecăţii, coordonării neuro-musculare, care antrenează o scădere importantă a eficacităţii scafandrului până la ineficacitate şi chiar moarte. Fazele de evoluţie ale narcozei sunt excitaţia şi inhibiţia. Excitaţia este o fază de scurtă durată, în care apar simptome de hiperreflexivitate, nelinişte şi agitaţie. Inhibiţia urmează imediat, cu simptomele ei: somnolenţă, bradicardie şi hiporeflexivitate până la lipotimie. Cert este că toţi scafandrii care coboară sub 30 m încearcă un sentiment de bună dispoziţie. Este vorba de o uşoară euforie comparabilă cu un stadiu iniţial de beţie alcoolică. Această uşoară "beţie" este reversibilă şi fără urmări şi este periculoasă numai pentru scafandri începători şi izolaţi. "Beţia" dispare instantaneu în momentul ridicării spre suprafaţa apei cu câţiva metri.

Narcoza nu se manifestă, în mod regulat, la toţi scafandrii şi la aceeaşi adâncime. Limita zonei de securitate este influenţată de predispoziţia individuală şi de antrenamentul progresiv, favorabil echilibrării structurii mintale. Narcoza poate fi o cauză a morţii prin înec la adâncimi mari şi trebuie pusă pe seama imprudenţei scafandrului şi a ostilităţii mediului ambiant.

În ceea ce priveşte explicaţia mecanismului narcozei, au fost emise o serie de ipoteze, mai mult sau mai puţin realiste. Mecanismul exact nu se cunoaşte, dar sunt demne de enumerat câteva ipoteze, rezultate în urma cercetărilor întreprinse:

– acţiunea specifică a gazului inert;
– creşterea presiunii parţiale a dioxidului de carbon alveolar şi/sau tisular;
– fenomenele fiziopatologice în care oxigenul joacă un rol preponderent.

În afară de narcoza gazului inert utilizat pentru diluarea oxigenului din amestecul respirator, mai există şi alţi factori limitatori importanţi aşa cum sunt **S**indromul **N**ervos al **Î**naltelor **P**resiuni (**SNIP**), **S**indromul **R**espirator al **Î**naltelor **P**resiuni (**SRIP**) şi **S**indromul **A**rticular al **Î**naltelor **P**resiuni (**SAIP**). În tabelul 4.18 sunt prezentate limitele de adâncime de scufundare datorită factorilor limitatori specifici diferitelor amestecuri respiratorii utilizate în scufundare.

Tabelul 4.18

Limitele adâncimii de scufundare pentru diferitele amestecuri respiratorii

Adâncime de scufundare [m]	Amestec respirator	Factori limitatori
0...60	Aer (NITROX) (N_2 - O_2)	Narcoza azotului Jenă respiratorie
60...150	HELIOX (He - O_2)	–
60...200	HIDROX (H_2 - O_2)	Narcoza hidrogenului
150...450	HELIOX (He - O_2) HIDRELIOX (H_2 - He - O_2)	SNIP – SRIP – SAIP
450...700	HIDRELIOX (H_2 - He - O_2)	SNIP – SRIP

Se poate trage concluzia că, de fapt, nu există decât o singură "narcoză" la care tulburările apar mai devreme sau mai târziu în funcţie de puterea narcotică a amestecului gazos utilizat. Această binecunoscută "putere narcotică" nu este direct proporţională cu proprietăţile fizice ale gazelor, dar este proporţională cu coeficienţii lor de solubilitate în lipide.

În tabelul 4.19 se prezintă scara puterilor narcotice P.N. a gazelor inerte şi a protoxidului de azot NO_2 în funcţie de puterea narcotică a azotului caracterizat prin valoarea 1.

Tabelul 4.19

Tabel cu puterile narcotice ale gazelor zise "inerte" şi NO_2

Gaz	He	Ne	H_2	N_2	Ar	Kr	N_2O	Xe
P.N.	0,07	0,2	0,26	1	1,7	10	28,1	34,5

Un alt neajuns, la fel de important, îl constituie faptul că la decompresie gazul inert formează bule care pot provoca accidente serioase în cazul nerespectării unei proceduri specifice de revenire la presiunea atmosferică. În plus, absenţa prelungită a azotului din amestecurile respiratorii poate sta la baza unor importante modificări de ordin fiziologic, iar în perioada schimbărilor de amestecuri respiratorii apare, la nivelul membranelor celulare, o contradifuzie izobarică a gazelor inerte dizolvate în ţesuturile umane.

4.10.1. EFECTELE AZOTULUI DIN AMESTECURILE RESPIRATORII

Limitele impuse de azot sunt legate de efectul narcotic al acestuia. Efectele sunt detectabile, pentru respirarea de aer, începând de la 35...40 m adâncime. Primele simptome nu sunt grave, dar la subiecţii neantrenaţi pot apărea complicaţii. Limitele impuse de azot în scufundare sunt prezentate în figura 4.25.

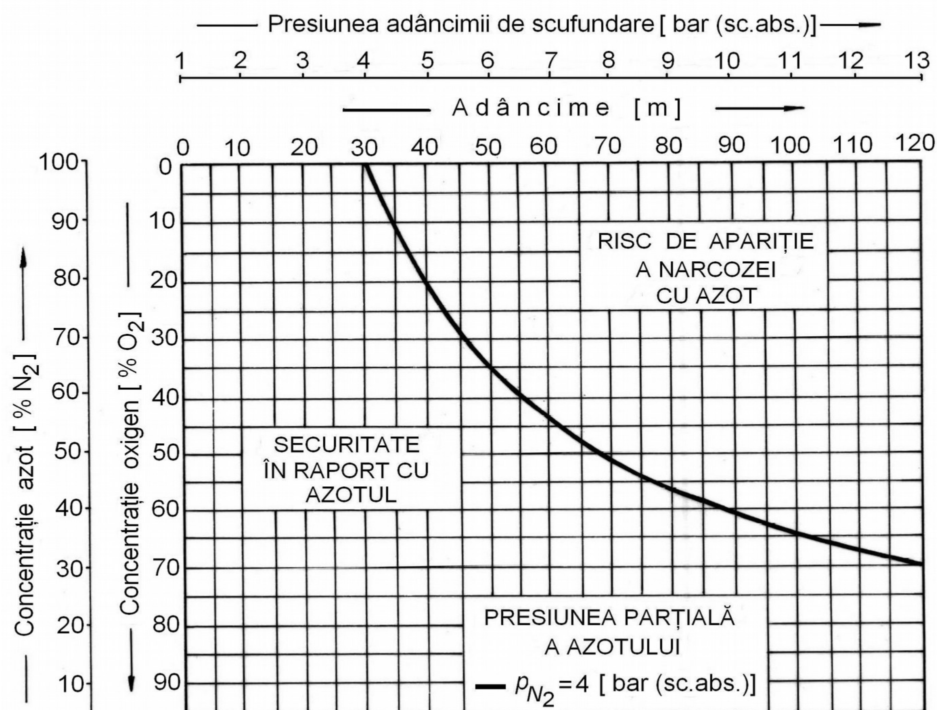


Fig. 4.25. Reprezentarea grafică a limitelor impuse pentru azot în amestecurile respiratorii.

Pe abscisă este reprezentată adâncimea de scufundare în metri şi presiunea corespunzătoare în bar (sc. abs.), iar pe ordonată sunt reprezentate concentrațiile de oxigen (%O_2) şi de azot (%N_2) din amestecul binar NITROX. Curba din figură este locul geometric al punctelor a căror presiune parțială a azotului este p_{N_2} =4 bar (sc. abs.). Respirând un amestec NITROX caracterizat printr-o presiune parțială a azotului peste valoarea corespunzătoare curbei cu p_{N_2} =4 bar (sc. abs.), se riscă apariția narcozei cu azot (beția adâncurilor).

Practic, se poate spune că narcoza cu azot pentru utilizarea aerului ca amestec respirator, apare începând de la adâncimea de 50 m, funcție de individ şi că, de la 70 m adâncime, nimeni nu scapă de acest efect.

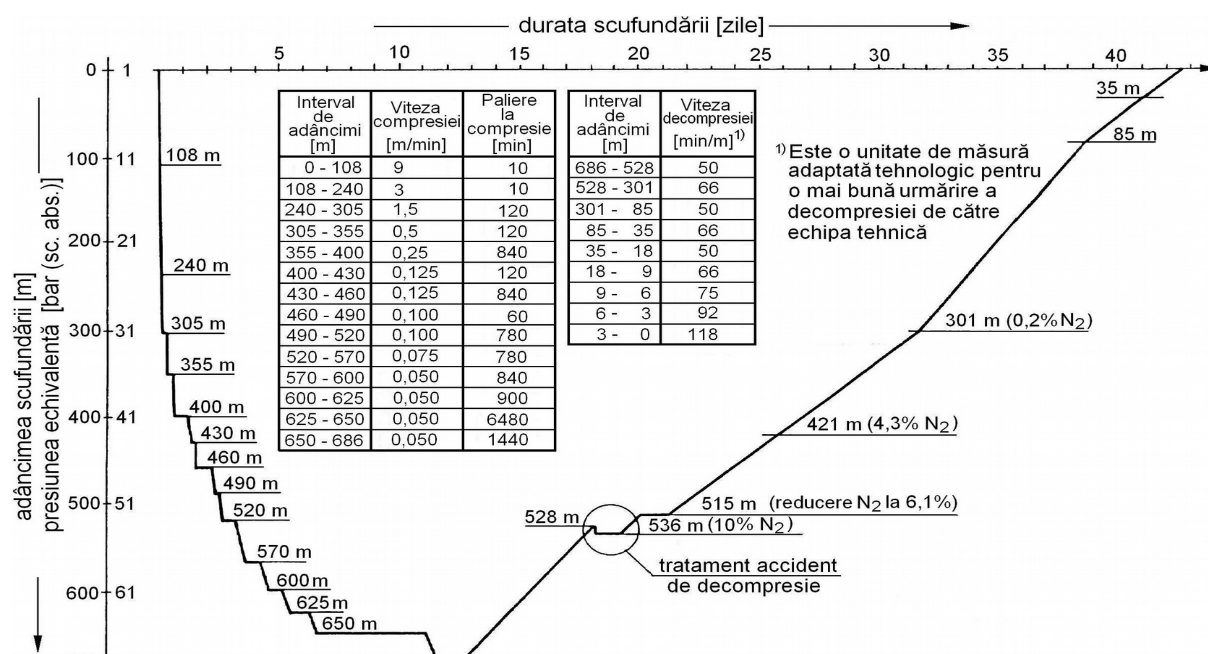
Narcoza cu azot a fost observată încă din anul 1835 de către Franchman care arată: "funcțiile creierului sunt activate, imaginea este vioaie, ideile au un şarm ciudat". Abia după o sută de ani, în 1935, Behnke descrie pentru prima dată tulburările provocate de azot, acea beție a adâncurilor, numită de către Hill şi Mac Leod, în anul 1930, "nytrogen narcosis".

Efectele narcotice ale azotului din aerul respirat la presiuni ridicate par mai apropiate de efectele provocate LSD-25 sau de efectele datorate intoxicațiilor etilice. De asemenea, se mai pot compara cu efectele narcotice ale unor droguri ca morfina, barbituricele sau etanolul. Totuşi, mecanismele nu sunt similare.

4.10.2. EFECTELE HELIULUI DIN AMESTECURILE RESPIRATORII

Numeroşi cercetători, printre care Case şi Haldane, Marshale, Behnke, Bennett şi Brauer au efectuat corelații între proprietățile gazelor inerte şi puterea lor narcotică. Toți au fost de acord că heliul ocupă o poziție privilegiată față de celelalte gaze inerte. Într-adevăr, dacă se iau în considerație polarizabilitatea diferitelor gaze inerte şi raportul acesteia la volumul molar, constanta *a* de atracție intermoleculară (forța Van der Waals), solubilitatea în lipide şi raportul solubilității în grăsimi şi apă, funcție de teoria *coeficientului de partaj* a lui Mayer-Overton, prin care un anestezic are o putere narcotică cu atât mai mare cu cât este mai solubil în apă, heliul se află pe primul loc în ceea ce priveşte majoritatea proprietăților fizice. Hidrogenul şi neonul se află imediat după heliu şi înaintea azotului.

În continuare sunt prezentate, spre exemplificare, performanțele obținute în scufundare cu amestecuri respiratorii HELIOX de către unele şcoli de scufundare. Astfel, în figura 4.26 este prezentat profilul scufundării ATLANTIS III, efectuată de specialiştii americani la adâncimea de 688 m în cadrul F. G. Hall Laboratory din Duke University Medical Center (fig. 4.27), în figura 4.28 profilul scufundării SAGITTAIRE IV, efectuată de către francezi la adâncimea de 610 m în cadrul Centre d'Essais Hyperbares (CEH) COMEX din Marsilia (fig. 4.29), iar în figura 4.30 profilul scufundării PONTUS IV, efectuată la adâncimea de 500 m în cadrul Laboratorului Hiperbar din cadrul Centrului de Scafandri Constanța (fig. 4.31).



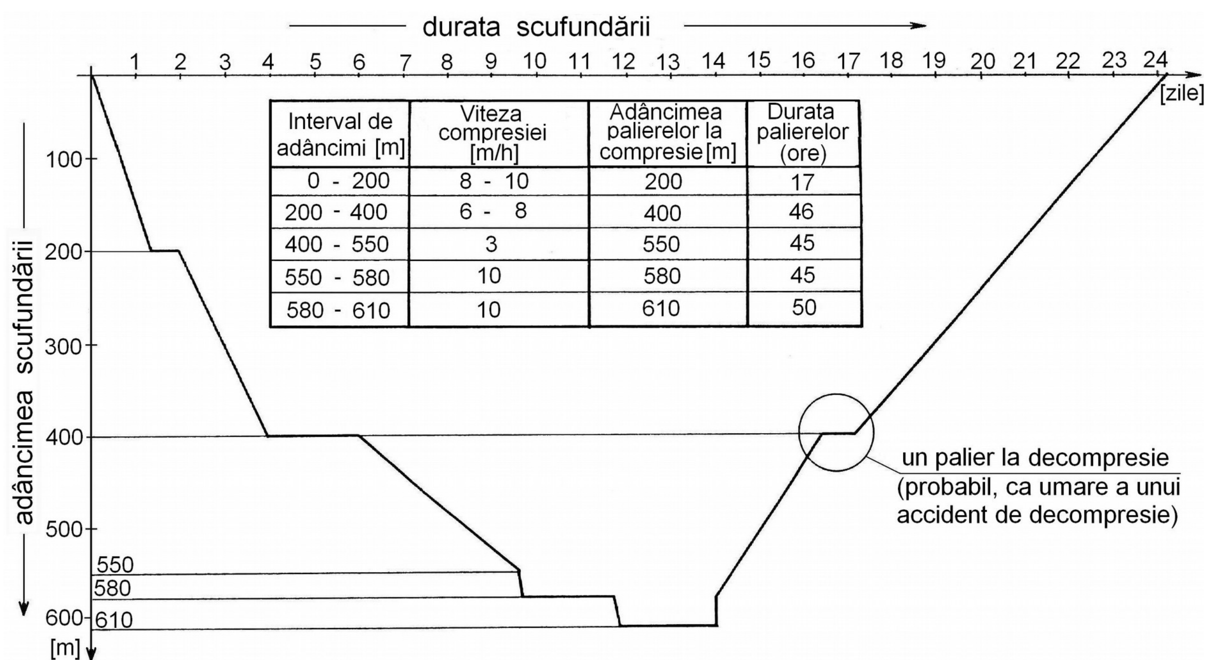
Interval de adâncimi [m]	Viteza compresiei [m/min]	Paliere la compresie [min]
0 - 108	9	10
108 - 240	3	10
240 - 305	1,5	120
305 - 355	0,5	120
355 - 400	0,25	840
400 - 430	0,125	120
430 - 460	0,125	840
460 - 490	0,100	60
490 - 520	0,100	780
520 - 570	0,075	780
570 - 600	0,050	840
600 - 625	0,050	900
625 - 650	0,050	6480
650 - 686	0,050	1440

Interval de adâncimi [m]	Viteza decompresiei [min/m][1)]
686 - 528	50
528 - 301	66
301 - 85	50
85 - 35	66
35 - 18	50
18 - 9	66
9 - 6	75
6 - 3	92
3 - 0	118

Fig. 4.26. Profilul scufundării în saturație ATLANTIS III executată la F.G Hall Laboratory, Duke University Medical Center.



Fig. 4.27. Scafandri americani în timpul unui experiment din programul ATLANTIS III, în barocamera aflată în dotarea F. G. Hall Laboratory din Duke University Medical Center.



Interval de adâncimi [m]	Viteza compresiei [m/h]	Adâncimea palierelor la compresie [m]	Durata palierelor (ore)
0 - 200	8 - 10	200	17
200 - 400	6 - 8	400	46
400 - 550	3	550	45
550 - 580	10	580	45
580 - 610	10	610	50

Fig. 4.28. Profilul aproximativ al scufundării în saturație SAGITTAIRE IV executată la Centre d'Essais Hyperbares (CEH) COMEX din Marsilia.



Fig. 4.29. Barocameră utilizată pentru scufundări cu HELIOX, aflată în compunerea ansamblului de barocamere din cadrul Centre d'Essais Hyperbares COMEX din Marsilia.

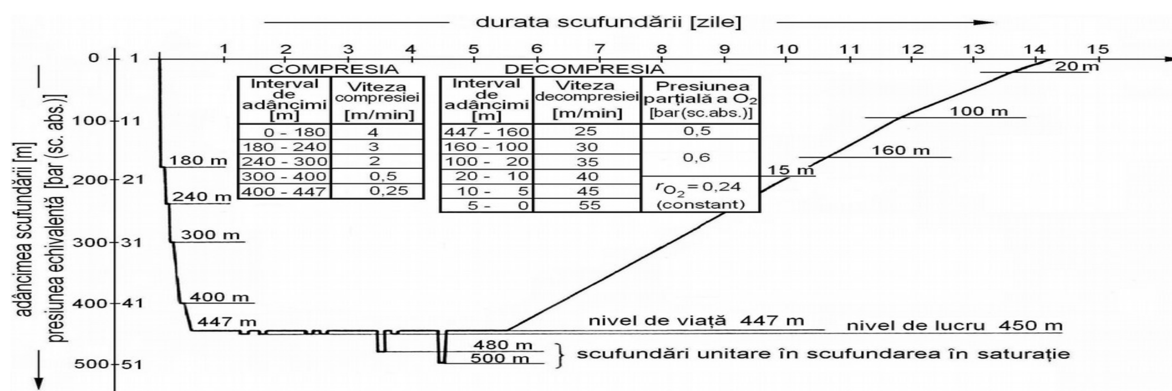


Fig. 4.30. Profilul scufundării în saturație PONTUS IV executată în cadrul Laboratorului Hiperbar din cadrul Centrului de Scafandri Constanța, după o procedură originală.



Fig. 4.31. Sistemul de barocamere aflat în dotarea Laboratorului Hiperbar din cadrul Centrului de Scafandri Constanța.

În România, prin eforturile depuse de colectivul Laboratorului Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri din Constanța, în anul 1984 s-a atins adâncimea record de 500 m în cadrul experimentului PONTUS IV, utilizându-se o tehnologie originală cu amestecuri respiratorii binare heliu-oxigen (HELIOX).

Presurizarea scafandrului cu amestecuri heliu-oxigen, induce, la adâncimi ce depăşesc 150…180 m, apariția aşa numitului sindrom norvos al înaltelor presiuni (S.N.I.P.). Acest sindrom se traduce prin:

– tulburări motorii: tremur şi dismetrie, imprecizie şi necoordonare a gesturilor, pierderea echilibrului;
– scăderea nivelului de vigilență, tendințe spre dezinteres, încetinire mintală şi somnolență;
– modificări electroencefalografice precare şi discrete la început, importante mai apoi, cu instalarea de trasee şi bufee de unde lente. Aceste trasee sunt îngrijorătorare pentru că nu corespund nici somnului normal nici celui antestezic.

Pentru ameliorarea S.N.I.P. au fost efectuate cercetări care s-au axat pe două direcții:

– reducerea vitezelor de compresie (presurizare) a scafandrilor şi efectuarea de paliere de acomodare la diferite adâncimi considerate critice;
– injectarea de azot în amestecul repirator heliu-oxigen în proporții de 5...20%, pentru a se profita de efectul narcotic al acestuia în ameliorarea S.N.I.P.

Ambele direcții au dat rezultate satisfăcătoare, omul putând pătrunde sub apă la adâncimi mai mari de 500 m, respirând fie un amestec sintetic binar heliu-oxigen (HELIOX), fie un amestec sintetic ternar heliu-azot-oxigen (TRIMIX). Astfel, în anul 1974, COMEX prin programul SAGITTAIRE, atinge în scufundare simulată adâncimea de 610 m utilizănd amestecuri binare HELIOX, iar în anul 1981, prin experimentul ATLANTIS III efectuat în Laboratorul Hiperbar de la Duke University se atinge, în scufundare simulată, adâncimea de 686 m utilizând amestecuri ternare TRIMIX.

4.10.3. EFECTELE HIDROGENULUI DIN AMESTECUL RESPIRATOR

Pentru depăşirea problemelor create de cei doi factori limitatori ai eficacității scafandrului în scufundări la adâncimi de peste 150...180 m (**S**indromul **N**ervos al **Î**naltelor **P**resiuni – **S.N.I.P.** şi limitările ventilării respiratorii prin mărirea rezistenței respiratorii datorită creşterii densității amestecului gazos de o manieră proporțională cu adâncimea), s-a impus necesitatea efectuării de cercetări şi programe de scufundare de încercare privind utilizarea hidrogenului ca diluant al oxigenului.

Riscurile deosebite care pot apărea la utilizarea hidrogenului în scufundare prin pericolul de explozie, au impus o serie de măsuri speciale. În plus, puritatea hidrogenului obținut industrial nu a satisfăcut datorită conținutului de poluanți. Pentru experimentări umane hidrogenul trebuie obținut prin procese catalitice, purificat criogenic, până la puritatea de 99,995%. Impuritățile acceptabile sunt: O_2 < 100 ppm, N_2 < 100 ppm, CO < 5 ppm, CH_4 < 5 ppm, arsine şi fosfine < 0,0015 ppm.

Prima scufundare în saturație, cu oameni în ambianță hiperbară şi utilizând amestec respirator hidrogen-oxigen (HIDROX), s-a efectuat în anul 1985 prin experimentul HYDRA V la adâncimea de 450 m. Experimentele au contituat în anul 1986 cu scufundarea HYDRA VI la adâncimea de 520 m, în anul 1987 cu scufundarea HYDRA VII la adâncimea de 260 m şi în anul 1988 cu scufundarea HYDRA VIII cu 6 oameni timp de 6 zile la adâncimea de 530 m, scufundare realizată în condiții reale, în mare. Aceste experimente efectuate de către COMEX din Franța au deschis drumul unei noi metode de lucru sub apă pe şantierele subacvatice.

Pentru exemplificare, în figura 4.32 este prezentat profilul scufundării în saturație, cu amestec respirator HIDROX, la adâncimea de 260 m, al experimentului HYDRA VII. În figura 4.33 este prezentată o schemă generală a ansamblului de scufundare utilizat pentru acest experiment.

În experimentul HYDRA VII scafandrii au fost comprimați în 4 ore, cu amestec HELIOX, la adâncimea de 180 m, după care amestecul HELIOX a fost înlocuit cu amestec HIDROX până când, în noul amestec din ansamblul de scufundare, concentrația hidrogenului s-a ridicat la 90%. În această perioadă s-a constatat la scafandri o uşoară euforie timp de 15...30 minute, comparabilă cu narcoza constatată în scufundări cu aer comprimat la adâncimea de 40...50 m. Această uşoară narcoză a dispărut destul de rapid, ceea ce a permis continuarea presurizării la presiunea corespunzătoare adâncimii de 260 m. Înainte de compresie s-a efectuat dehidrogenarea, timp de 40 ore, la 260 m, cu viteza de 0,6 bar (sc. abs.) de hidrogen pe oră. Decompresia finală s-a efectuat cu amestec HELIOX.

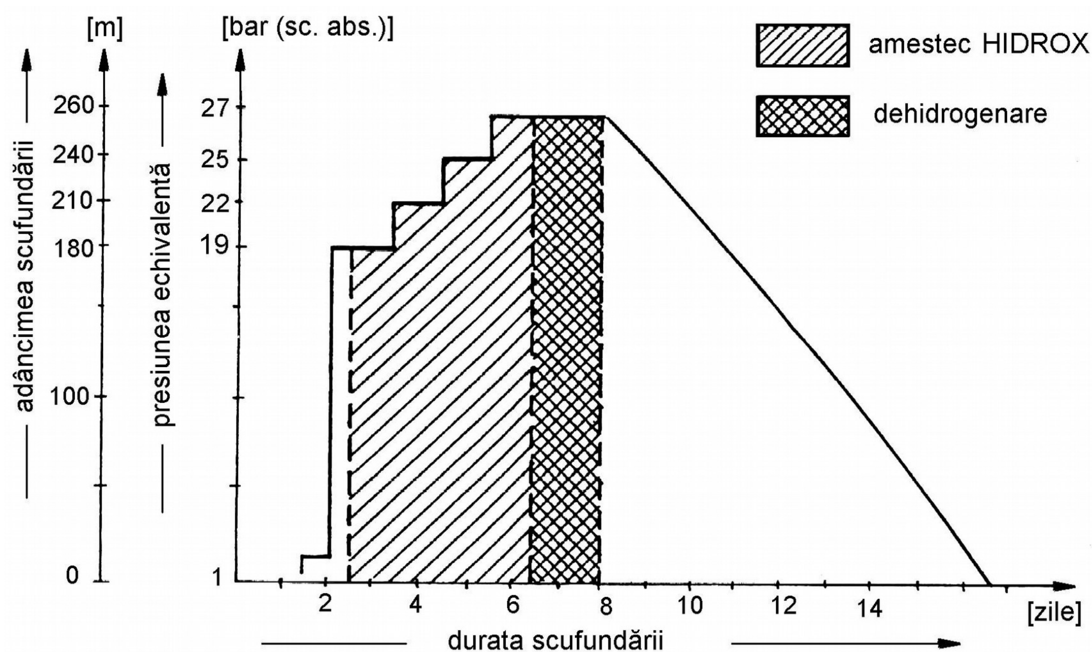


Fig. 4.32. Profilul scufundării în saturație cu amestec respirator HIDROX efectuată în cadrul experimentului HYDRA VII (COMEX).

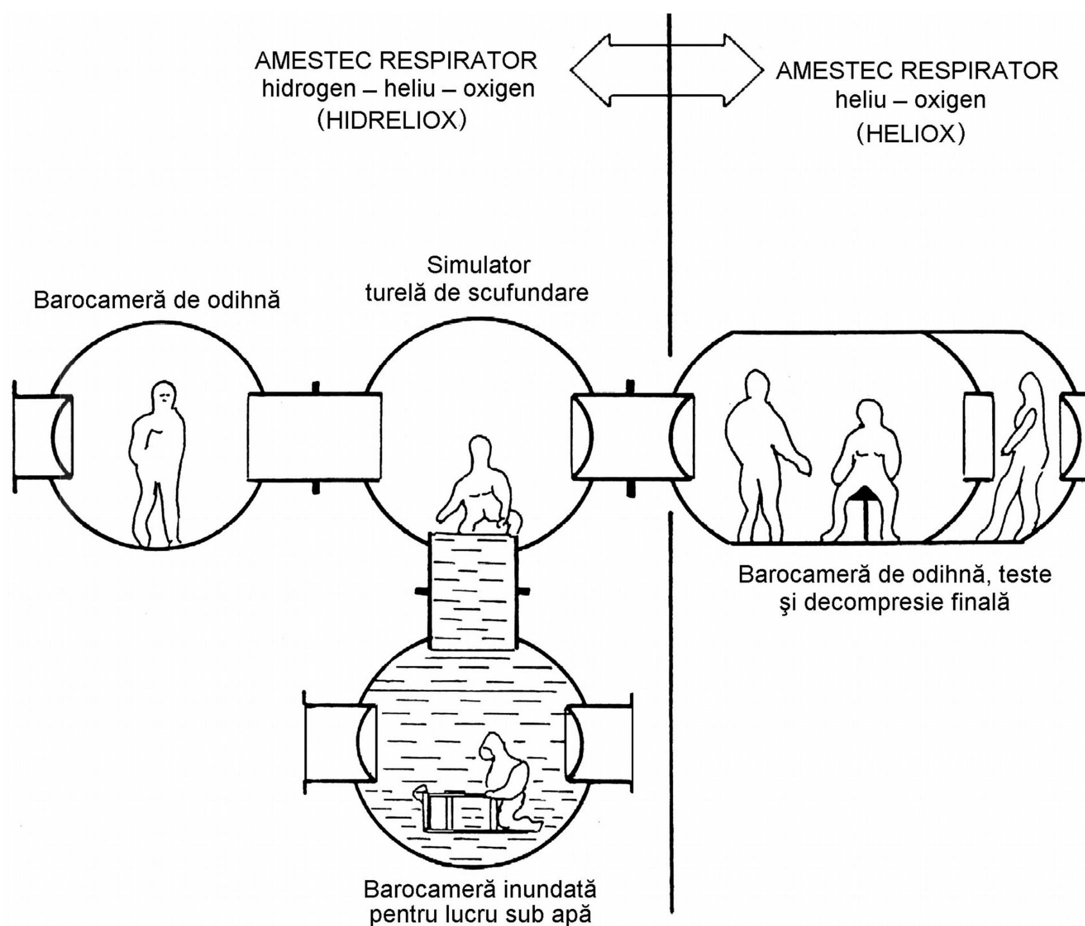


Fig. 4.33. Schema generală a ansamblului de scufundare utilizat pentru experimentul HYDRA VII (COMEX).

Scufundările experimentale cu utilizarea hidrogenului efectuate de COMEX la Centrul de Încercări Hiperbare din Marsilia, au continuat cu experimentul HYDRA IX în anul 1989, care a permis precizarea domeniului de utilizare a amestecului HIDROX şi efectele asupra omului la o expunere de lungă durată.

În anul 1992, în barocamerele Centrului de Încercări Hiperbare al COMEX din Marsilia (fig. 4.34) s-a realizat scufundarea de testare HYDRA X, în care, după 13 zile de compresie, scafandrul Theo Mavrostomos a atins adâncimea record de 701 m [71,1 bar (sc. abs.) sau 7,11 MPa (sc. abs.)] (fig. 4.35). Acesta a efectuat şi o demonstrație de lucru pe durata a trei ore în barocamera cu apă (fig. 4.36).



Fig. 4.34. Barocamere aparținând sistemului pentru scufundări simulate cu amestecuri pe bază de hidrogen din cadrul C.E.H. COMEX din Marsilia.



Fig. 4.35. Scafandrul Theo Mavrostomos aflat la adâncimea record de 701 m în cadrul programului HYDRA X.



Fig. 4.36. Demonstrație de lucru efectuată de Theo Mavrostomos în barocamera cu apă (experimentul HYDRA X – 701 m)

Rezultatele obținute în utilizarea hidrogenului ca diluant al oxigenului pentru scufundări în saturație la adâncimi mari au fost pozitive. Problemele tehnice legate de injectarea oxigenului în incintele hiperbare, pentru completarea celui consumat de scafandri, precum şi problemele legate de etanşare, au fost rezolvate şi s-a concluzionat că hidrogenul poate constitui o nouă soluție, ca diluant al oxigenului, pentru viața sub presiune.

În cursul scufundărilor din cadrul programului francez HYDRA, efectuate cu amestecuri respiratorii pe bază de hidrogen, la presiuni parțiale ale hidrogenului p_{H_2} = 1,9...3 MPa (sc. abs.) (tab. 4.20), s-au observat anumite efecte ale amestecului pe bază de hidrogen asupra organismului uman, efecte ce pot fi grupate sub denumirea de *narcoza hidrogenului*. Aceste efecte au putut fi studiate în raport cu observațiile clinice efectuate în timpul scufundărilor la adâncimi echivalente utilizând un amestec HELIOX.

Tabelul 4.20

Scufundările experimentale în saturație, cu amestecuri respiratorii pe bază de hidrogen, realizate de C.E.H. COMEX

Scufundarea experimentală	Adâncimea de scufundare [m]	Tip amestec respirator utilizat	Presiunea amestecului respirator p_{am} [bar(sc.abs.)]	Presiunea parțială a hidrogenului p_{H_2}		Timp de expunere la amestec cu hidrogen [zile]	Număr scafandri
				MPa (sc.abs.)	bar (sc.abs.)		
HYDRA V (1985)	450 450	HIDRELIOX (H_2-He-O_2)	46 46	2,5 2,5	25 25	4 18	3 3
HYDRA VI (1986)	520	HIDRELIOX (H_2-He-O_2)	53	2,4	24	15	8
HYDRA VII (1987)	260	HIDROX (H_2-O_2)	27	2,5	25	5	4
HYDRA VIII (1988)	520/534	HIDRELIOX (H_2-He-O_2)	53/54,4	2,5	25	18	6
HYDRA IX (1989)	300 225/200	HIDROX (H_2-O_2)	31 23,5/21	3 1,9	30 19	19 30	4 3
HYDRA X (1992)	675/701	HIDRELIOX (H_2-He-O_2)	68,5/71,1	2,0	20	29	3

A rezultat faptul că hidrogenul acționează asupra organismului uman astfel:

– provoacă manifestări psiho-senzoriale şi comportamentale stăpânite (tulburări de percepție, modificări ale somnului, modificări psihologice şi de intelect, pentru p_{H_2} < 2,4 MPa (sc. abs.)) sau nestăpânite (anxietate, depresie, stare de confuzie şi dezorientare, pentru p_{H_2} =2,4...3 MPa (sc. abs.)) de către scafandri;

– atenuează efectele provocate de sindromul nervos al înaltelor presiuni – SNIP (dispariția aproape completă a tremurului), de sindromul articular al înaltelor presiuni – SAIP (atenuarea netă a durerilor şi jenelor articulare) şi de sindromul respirator al înaltelor presiuni – SRIP (ventilare facilă cu efort muscular respirator mai puțin intens).

Testele efectuate de către COMEX în cadrul programului de scufundări HYDRA au pus în evidenţă faptul că, pentru un amestec pe bază de hidrogen cu o presiune parţială a hidrogenului în zona a 2 MPa (sc. abs.), tulburările datorate "narcozei hidrogenului" sunt bine controlate şi compensate de către scafandri. De asemenea, se poate desprinde faptul că, prin utilizarea de amestecuri respiratorii pe bază de hidrogen, zona de adâncimi cuprinsă între 150 m şi 650 m poate fi considerată ca accesibilă unei largi categorii de scafandri. Amestecul respirator HIDRELIOX, limitând efectele SNIP şi mărind confortul respirator, ameliorează în mod considerabil eficacitatea şi capacitatea de lucru a scafandrilor la instalaţiile submarine de producţie a hidrocarburilor. Astfel, companiile petrolifere sunt, în prezent, asigurate de o capacitate tehnică umană în zonele cu adâncimi ce depăşesc posibilităţile scufundării convenţionale cu heliu (adâncimi de peste 200 m).

Avantajele utilizării hidrogenului sunt legate şi de abundenţa acestuia, comparativ cu heliul. Totuşi, hidrogenul nu poate înlocui complet heliul, în special la decompresie, când concentraţia oxigenului creşte pe măsură ce scade presiunea, până la 24%, pe ultimii 10 m spre presiunea atmosferică.

Hidrogenul are dezavantajul că este un gaz exploziv când este amestecat cu aer în proporţii ce includ prezenţa a 5,3% oxigen. În amestec cu peste 4% oxigen, hidrogenul devine, în mod spontan, exploziv. Pentru a se evita riscul combinaţiei chimice, concentraţia volumică de oxigen din amestecul respirator HIDROX trebuie să fie mai mică de 4% ($r_{O_2} < 0,04$). Cuprinsă între 2,5% şi 0,6% ($r_{O_2} = 0,025...0,006$), deci inofensiv în combinaţie cu hidrogenul, această concentraţie de oxigen permite utilizarea amestecului HIDROX la scufundări la adâncimi cuprinse între 70 şi 700 m.

4.11. REZULTATELE CERCETĂRILOR EFECTUATE ÎN ROMÂNIA PRIVIND EFECTELE AMESTECURILOR RESPIRATORII

Din cercetările efectuate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanţa sunt prezentate două situaţii în care au fost determinate performanţele mintale ale scafandrilor: în scufundări cu aer comprimat la adâncimea de 72 m şi în scufundări în saturaţie cu amestecuri binare NITROX. Pentru scufundările cu aer la adâncimea de 72 m viteza compresiei a fost de 15 m/min, iar pentru scufundările în saturaţie cu NITROX viteza compresiei a fost de 1 m/min. Rezultatele testelor sunt prezentate în figurile 4.37 şi 4.38. Testele au constat în efectuarea unor operaţiuni matematice (adunare, scădere, înmulţire şi împărţire) la suprafaţă (la presiunea atmosferică) şi imediat după terminarea compresiei. S-a determinat variaţia performanţei obţinute după compresie faţă de rezultatele obţinute la presiunea atmosferică.

În scufundările cu aer comprimat la 72 m adâncime au fost investigaţi 50 de scafandri (fig. 4.37). La 64,6% dintre aceştia s-au constatat deteriorări ale performanţei intelectuale, în timp ce la 35,4% din numărul scafandrilor nu au apărut modificări sau chiar au crescut performanţele. Din totalul scafandrilor investigaţi, 52,26% s-au încadrat în limitele de variaţie a performanţei cuprinse între -10% şi +20%, 68,76% în limitele cuprinse între -20% şi +20% şi 85,43% în limitele cuprinse între -30% şi +20%. Rezultatele obţinute au stat la baza definirii limitelor aptitudinii de scufundare în cadrul testului de narcoză, pentru scafandrii profesionişti ce execută scufundări cu aer comprimat până la adâncimea de 60 m, considerându-se acceptabile limitele de variaţie a performanţei intelectuale cuprinse între -30% şi +20%.

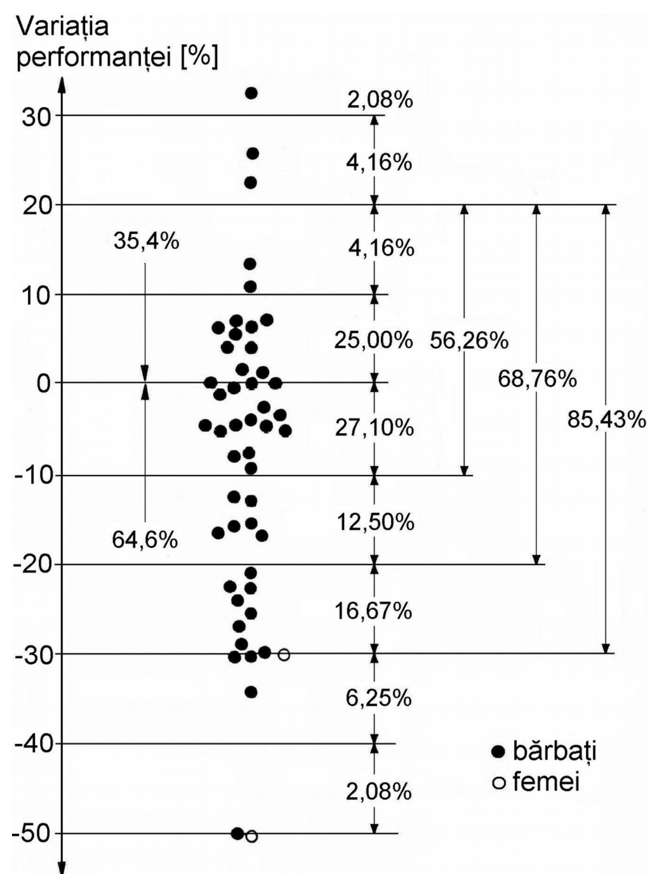


Fig. 4.37. Variația performanței intelectuale în scufundări cu aer comprimat la adâncimea de 72 m.

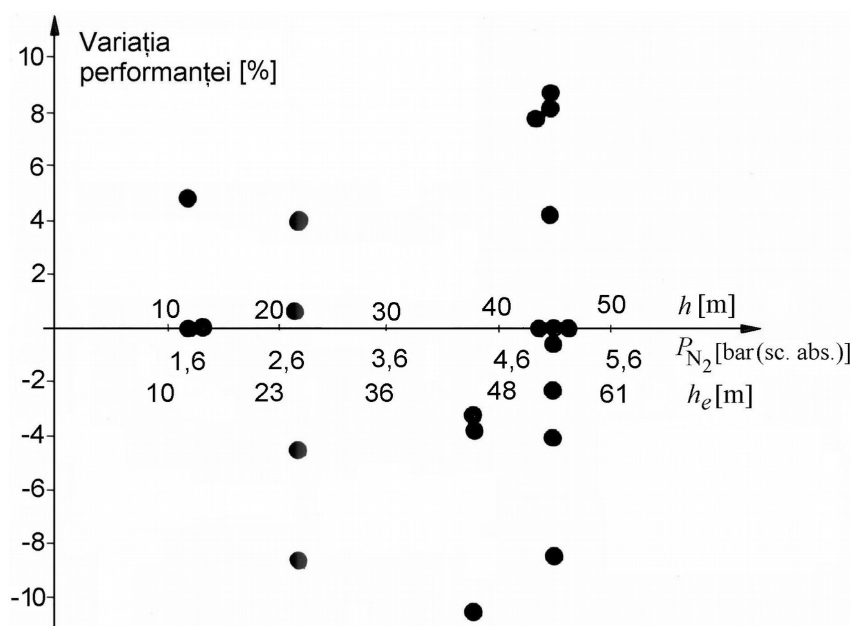


Fig. 4.38. Variația performanței intelectuale la scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii NITROX (h – adâncimea, p_{N_2} – presiunea parțială a azotului din amestecul respirat, h_e – adâncimea echivalentă dacă amestecul respirator ar fi fost aer).

S-au adoptat limite atât în zona de scădere a performanţei cât şi în zona de creştere a performanţei deoarece, în operaţiunile subacvatice este nevoie de oameni bine echilibraţi psihic. În general, nu sunt acceptate extremele, chiar dacă sunt pozitive. Reacţiile acestor oameni nu sunt totdeauna previzibile.

În cazul scufundărilor în saturaţie la adâncimea de 50 m cu amestecuri respiratorii NITROX (fig. 4.38) deteriorarea performanţei intelectuale a avut loc la 50% din numărul scafandrilor investigaţi, deteriorare ce nu a depăşit 10%. O concluzie imediată reiese din faptul că efectul narcotic al azotului se datorează nu numai gazului inert ci şi modului de executare a compresiei (pătrunderii sub apă). Creşterea vitezei de compresie amplifică efectele narcotice ale azotului. Această amplificare se poate pune pe seama unui sindrom nervos şi/sau creşterii presiunii parţiale a dioxidului de carbon din amestecul respirat.

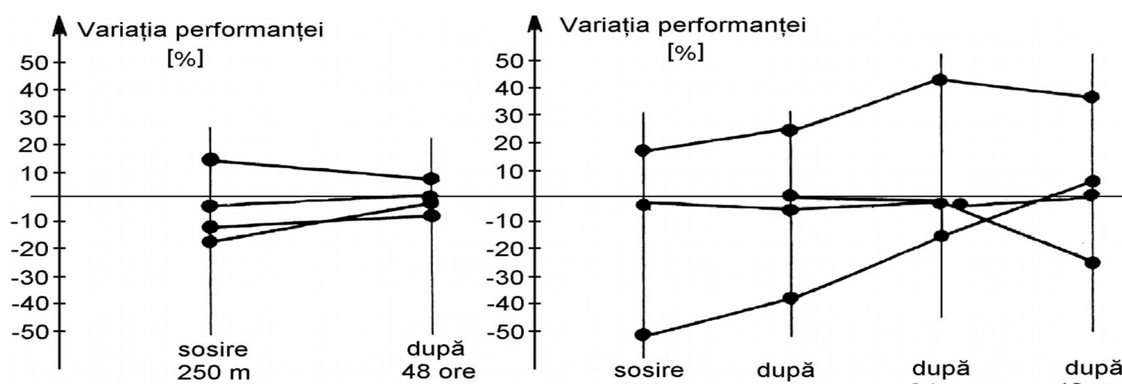


Fig. 4.39. Variaţia performanţei intelectuale la scufundări în saturaţie cu amestecuri respiratorii HELIOX la adâncimi de: *a* – 250 m; *b* – 350 m.

Pentru scufundări cu amestecuri respiratorii HELIOX, la Laboratorul Hiperbar din Constanţa s-au efectuat două experimente. Concentraţia azotului din amestecul respirator HELIOX utilizat nu a depăşit 4%. Performanţele intelectuale obţinute sunt prezentate în figura 4.39. În experimentul efectuat la adâncimea de 250 m (fig. 4.39,*a*) se observă o variaţie a performanţei intelectuale cuprinsă între -16,7% şi +13,9%, la testele efectuate imediat după atingerea presiunii de 26 bar (sc. abs.). În experimentul efectuat la adâncimea de 350 m(fig. 4.39,*b*), la testele efectuate imediat după atingerea presiunii maxime, variaţia performanţei intelectuale s-a încadrat între limitele -52,8% şi +16,7%, după 12 ore de staţionare la presiunea maximă între limitele -38,9% şi +23,3%, după 24 ore între limitele -16,7% şi +41,7% şi după 48 ore între limitele -27,8% şi + 36,2%. O evoluţie interesantă o are unul dintre subiecţi care de la performanţa de -52,8% stabilită imediat după terminarea compresiei, ajunge, după 48 ore de acomodare, la performanţa pozitivă de +2,7%.

În ambele experimente se poate constata o ameliorare bună a performanţei intelectuale pe timpul acomodării cu presiunea şi cu amestecul respirator sintetic HELIOX. Efectul narcotic al heliului se poate pune în evidenţă la presiuni mai mari de 26 bar (sc. abs.). Din cercetările efectuate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanţa au rezultat primele bareme româneşti de aptitudine pentru scufundări cu aer comprimat şi cu amestecuri sintetice NITROX şi HELIOX.

5.

EXPUNEREA LA PRESIUNE ŞI DECOMPRESIA SCAFANDRILOR

În timpul pătrunderii omului sub apă au loc următoarele procese:

– *expunerea organismului uman la presiunea exterioară*, timp în care omul respiră un amestec gazos la o presiune corespunzătoare adâncimii scufundării; gazul inert (în cazul amestecurilor binare) sau gazele inerte (în cazul amestecurilor ternare) din compoziția amestecului respirator sunt transportate în biomasa organismului şi se dizolvă în țesuturi;

– *revenirea la presiunea atmosferică (decompresia),* timp în care gazul sau gazele inerte, dizolvate în țesuturi pe timpul expunerii la presiune, sunt eliminate. Eliminarea trebuie să aibă loc astfel încât să nu se formeze bule de gaz periculoase.

5.1. GENERALITĂȚI PRIVIND EXPUNEREA LA PRESIUNE ŞI REVENIREA LA PRESIUNEA ATMOSFERICĂ A SCAFANDRULUI

Expunerea la presiune a scafandrului poate fi de scurtă durată (cazul scufundărilor unitare) sau de lungă durată (cazul scufundărilor în saturație). Funcție de durata de expunere la presiune, țesuturile organismului absorb o anumită cantitate sau se saturează cu gazul sau gazele inerte din componența amestecului respirator.

Expunerea la presiune a scafandrului se realizează în primele două etape ale scufundării şi anume în *etapa coborârii la adâncimea de lucru (compresiei*) şi în *etapa lucrului efectiv sub apă (staționării la nivelul de lucru).*

Pentru calcularea unui procedeu de revenire la presiunea atmosferică (decompresie), ce constă în stabilirea vitezelor de reducere a presiunii (urcare spre suprafața apei), adâncimii corespunzătoare palierelor de decompresie precum şi timpului de staționare la aceste paliere, este necesară cunoaşterea presiunii gazului sau a gazelor inerte dizolvate în țesuturile organismului pe timpul expunerii acestuia la presiune. Din considerente operaționale se impune ca scafandrul să revină la presiunea atmosferică în orice situație legată de starea mării şi de temperatura apei, într-un timp cât mai scurt posibil şi cu riscuri minime de accidente.

Problema fundamentală legată de calculul procedeelor de scufundare, constă în alegerea modelului matematic al transportului de gaze inerte în țesuturile organismului uman. Acest model matematic trebuie să îndeplinească două criterii cheie:

– să fie în măsură de a furniza o relație adecvată limitelor impuse de scufundările operaționale;

– să permită perfecționări, în urma culegerii de date din scufundările experimentale, pentru creşterea probabilității succeselor în readucerea scafandrilor la presiunea atmosferică, în condițiile în care parametrii presiune de expunere, timp de expunere şi compoziție a amestecurilor respiratorii utilizate sunt modificați.

La decompresie, gazele inerte dizolvate în țesuturile organismului scafandrului se degajă şi se elimină prin plămâni. Această degajare poate avea loc în două moduri:

– prin trecerea directă a gazelor inerte din faza dizolvată în faza gazoasă la nivelul frontierelor alveolo-capilare; este ceea ce se numeşte transport monofazic şi corespunde decompresiilor corecte, nepatogene, oferite de tabelele de decompresie;

– prin trecerea gazelor inerte, sub formă de bule, în ţesuturi şi în sânge; acesta este modul cel mai periculos de transport şi corespunde transportului bifazic; totuşi, transportul bifazic bine controlat, poate asigura şi el revenirea în bune condiţii a scafandrului la presiunea atmosferică.

5.2. EXPUNEREA ORGANISMULUI SCAFANDRULUI ÎN CADRUL PRIMELOR DOUĂ FAZE ALE PROCESELOR HIPERBARE CU AER ŞI AMESTECURI RESPIRATORII SINTETICE, BINARE ŞI TERNARE

Activitatea subacvatică este reglementată de tabele de scufundare care indică modul cum trebuie efectuată fiecare etapă a scufundării, cu limitele de timp şi de adâncime respective. Pentru a se putea calcula o astfel de tabelă, trebuie bine cunoscute fenomenele fizice care au loc în organismul uman pe timpul expunerii în cadrul proceselor hiperbare cu aer sau cu amestecuri respiratorii sintetice, timp în care omul respiră un amestec gazos sub presiune. Este cunoscut faptul că organismul uman este format din schelet, ca parte solidă, grăsimi, parte unde solvenţii nepolari sunt preponderenţi, sânge şi muşchi, parte unde solventul majoritar este apa. Aceste elemente formează în unele locuri ca plămâni, sinusuri frontale şi parietale, ureche medie etc., cavităţi gazoase. În concluzie, corpul omenesc ar putea fi considerat, în mod simplist, ca fiind format din părţi solide, lichide şi gazoase.

Deoarece părţile solide şi lichide pot fi considerate incompresibile, numai umplerea cavităţilor gazoase ale organismului cu amestec respirator la presiunea hidrostatică corespunzătoare adâncimii scufundării asigură pătrunderea omului sub apă, neprotejat, la adâncimi mari. Această umplere a cavităţilor gazoase se realizează prin intermediul căilor respiratorii, omul fiind alimentat din aparate de respirat sub apă speciale, portabile sau nu, cu debit la cerere sau continuu, cu amestec gazos respirator la presiuni şi debite corespunzătoare adâncimilor de lucru. Deoarece oxigenul este gazul care asigură arderile metabolice, fiind considerat consumabil, singurul gaz care este luat în considerare pentru calculul tabelelor de decompresie este gazul inert sau gazele inerte din compunerea amestecurilor respiratorii.

Expunerea organismului uman la procesele hiperbare cu aer sau cu amestecuri respiratorii sintetice, specifice pătrunderii omului sub apă, se realizează în două faze: *compresia (presurizarea)* şi *lucrul efectiv sub presiune* la adâncimea maximă a scufundării. Funcţie de durata expunerii organismului uman la presiunea ambiantă se disting trei tipuri de scufundări: scufundări cu expuneri de scurtă, de medie şi de lungă durată. Cunoscut fiind faptul că organismul uman a fost împărţit, în mod formal, în compartimente de ţesuturi a căror perioadă de semisaturaţie variază de la câteva minute la câteva sute de minute, se poate face o corelaţie între perioada lor de semisaturaţie şi timpii de expunere la presiune. Astfel, *expunerea de scurtă durată* ar corespunde saturării compartimentelor de ţesuturi cu perioada de semisaturaţie de până

la 80 minute (cazul *scufundărilor unitare autonome*). *Expunerea cu durată medie* ar corespunde saturării compartimentelor de țesuturi cu perioada de semisaturație de până la 120 minute (cazul *scufundărilor unitare profunde de sistem*). *Expunerea de lungă durată* ar corespunde saturării compartimentelor de țesuturi cu perioada de semisaturație de peste 120 minute (cazul *scufundărilor în saturație*).

5.2.1. COMPRESIA SCAFANDRULUI

Compresia scafandrului se materializează prin procesele hiperbare care au loc pe timpul cât scafandrul este presurizat sau coboară până la adâncimea de lucru. În cazul scufundărilor unitare, timpul necesar compresiei (coborârii la adâncimea de lucru) se adaugă la durata totală a scufundării şi se ia în calcul la stabilirea procedeului de revenire la presiunea atmosferică. Din acest motiv, pentru scufundări unitare, viteza compresiei (de coborâre în imersiune) este importantă şi trebuie să fie cât mai mare posibil.

În cazul scufundărilor unitare autonome, timpul de lucru în imersiune fiind limitat, scafandrul trebuie să coboare cu viteze relativ mari, viteze ce pot atinge valori de până la 30 m/min. Aceleaşi viteze de compresie se ating şi în cazul scufundărilor unitare de sistem, până la adâncimi de 100 m. Între 100 m şi 180 m adâncime vitezele de compresie se reduc la 15 m/min până la 20 m/min. Pentru scufundări în saturație, vitezele de compresie sunt variabile, funcție de adâncime şi de natura amestecului respirator. Scufundările în saturație cu viteze mari, la adâncimi de peste 150...200 m, au pus în evidență "deteriorări" ale capacității fizice a scafandrilor, materializate prin oboseală intensă, amețeli, tremur etc. Aceste "deteriorări" au primit denumirea generică de Sindrom Nervos al Înaltelor Presiuni (SNIP). La început, SNIP a fost pus pe seama heliului din amestecul respirator sintetic, dar s-a dovedit că inducerea SNIP este provocată de viteza compresiei. Acesta a fost motivul pentru care, la Laboratorul Hiperbar din cadrul Centrului de Scafandri Constanța, s-a abordat studiul SNIP indus de vitezele de compresie mari în scufundări cu amestecuri respiratorii sintetice HELIOX, pentru a se pune la punct un barem de aptitudine pentru scafandrii care efectuează intervenții sub apă la mare adâncime.

În cadrul studiului s-au efectuat investigații electroencefalografice (EEG) şi de tremur postural. Se prezintă, în continuare, rezultatele investigării tremurului postural înregistrat cu ajutorul unui traductor seismic amplasat pe degetul median al mâinii drepte, pe un electroencefalograf adaptat special pentru aceste înregistrări. Au fost investigați 27 scafandri de mare adâncime în scufundări cu amestecuri respiratorii HELIOX, în care heliul reprezintă 95% ($r_{He}=0,95$) şi oxigenul 5% ($r_{O_2}=0,05$), la adâncimea de 180 m [$p_{He}=$18050 mbar (sc. abs.) şi $p_{O_2}=$950 mbar (sc. abs.)]. Viteza compresiei a fost de 10 m/min. Au fost făcute înregistrări la suprafață (presiunea atmosferică) şi imediat după ce s-a atins presiunea corespunzătoare adâncimii de 180 m [19 bar (sc. abs.)].

Datorită variațiilor individuale mari înregistrate la presiunea atmosferică, scafandrii au fost împărțiți în trei grupe funcție de amplitudinea tremurului înregistrat: o grupă cu tremur a cărui amplitudine a fost cuprinsă între 1 mm şi 3 mm, considerată *grupa cu tremur scăzut*, o *grupă cu tremur mediu* a cărui amplitudine a fost cuprinsă între 3 mm şi 5 mm şi o *grupă cu tremur mare* a cărui amplitudine a fost cuprinsă între 5 mm şi 7 mm. Amplitudinea tremurului postural a fost calculată, după înregistrările efectuate, din punct de vedere cantitativ, în milimetri şi, din punct de vedere calitativ, în procente funcție de valoarea obținută la presiunea atmosferică. În tabelele 5.1, 5.2 şi 5.3 sunt prezentate rezultatele obținute pe cele trei grupe de valori.

S-a observat că, în general, tremurul apare la scufundări ce depăşesc 150 m adâncime şi este caracterizat de un tremur vizibil la extremități (deget, mână), care se intensifică o dată cu creşterea adâncimii, aşa cum s-a demonstrat ulterior în experimentele efectuate la presiuni de 41 bar (sc. abs.) şi 51 bar (sc. abs.) în cadrul Laboratorului Hiperbar din cadrul Centrului de Scafandri Constanța.

Frecvența tremurului la presiunea atmosferică a fost de aproximativ 8...12 cicli/s. În procesele hiperbare nu au apărut modificări ale frecvenței tremurului. Amplitudinea tremurului creşte o dată cu creşterea presiunii, în mod semnificativ la scafandrii cu tremur inițial scăzut şi mediu şi nesemnificativ la scafandrii cu tremur inițial mare. Tremurul observat în scufundări la mare adâncime cu amestecuri respiratorii HELIOX a fost denumit "helium tremor", dar a fost observat şi în scufundări cu amestecuri respiratorii HIDROX. Etiopatologia fenomenului nu este cunoscută. Tremurul se consideră ca un simptom senzitiv legat de stressul proceselor hiperbare, stress care poate altera conducția nervoasă şi chiar metabolismul.

Tabelul 5.1

Determinări ale tremurului în regim hiperbar la scafandrii cu amplitudine scăzută a tremurului la presiunea atmosferică (1...3 mm)

Nr. crt.	Scafandrii	Amplitudinea tremurului [mm]		Creşterea față de suprafață [%]
		la 1 bar (sc. abs.)	la 19 bar (sc. abs.)	
1	M.A.	2,350 ± 0,372	3,866 ± 0,454	64,5
2	F.C.	2,016 ± 0,318	2,800 ± 0,334	38,9
3	E.N.	2,100 ± 0,109	6,583 ± 1,855	213,5
4	F.R.	1,650 ± 0,861	6,446 ± 1,022	291,0
5	P.M.	1,658 ± 0,743	2,207 ± 0,923	31,0
6	S.C.	1,505 ± 0,623	2,616 ± 1,037	73,8
7	V.V.	1,766 ± 0,871	2,461 ± 1,078	39,4
8	D.D.	2,578 ± 0,120	1,800 ± 0,095	-43,2
9	B.D.	2,264 ± 0,114	4,750 ± 0,175	52,3
10	D.O.	1,096 ± 0,051	1,736 ± 0,083	36,9
11	P.C.	2,031 ± 0,885	2,568 ± 1,050	26,4
Media		1,91282	3,44118	
Abaterea medie pătratică			1,21816	
t			2,94241 semnificativ $p < 0,05$	

Tabelul 5.2

Determinări ale tremurului în regim hiperbar la scafandrii cu amplitudine medie a tremurului la presiunea atmosferică (3...5 mm)

Nr. crt.	Scafandrii	Amplitudinea tremurului [mm]		Creşterea faţă de suprafaţă [%]
		la 1 bar (sc. abs.)	la 19 bar (sc. abs.)	
1	O.G.	3,883 ± 0,735	5,666 ± 0,983	45,9
2	N.V.	4,333 ± 1,211	6,050 ± 0,796	39,6
3	I.V.	3,666 ± 0,605	4,833 ± 1,605	33,2
4	S.D.	4,233 ± 0,484	4,516 ± 1,049	6,7
5	N.O.	4,933 ± 1,143	6,339 ± 2,359	28,7
6	R.M.	3,086 ± 0,136	7,191 ± 0,763	57,1
7	P.M.	3,181 ± 1,285	5,085 ± 2,500	62,6
8	L.P.	3,894 ± 1,681	6,525 ± 2,637	59,7
9	B.G.	3,086 ± 1,275	9,393 ± 2,047	74,8
10	I.C.	3,630 ± 1,553	3,639 ± 1,634	0,8
11	S.G.	3,115 ± 1,106	4,274 ± 1,890	37,2
Media		3,73136	5,77555	
Abaterea medie pătratică			1,5584	
t			4,14765 semnificativ $p < 0,05$	

Tabelul 5.3

Determinări ale tremurului la scafandrii cu amplitudine mare a tremurului la presiunea atmosferică (5...7 mm)

Nr. crt.	Scafandrii	Amplitudinea tremurului [mm]		Creşterea faţă de suprafaţă [%]
		la 1 bar (sc. abs.)	la 19 bar (sc. abs.)	
1	D.C.	5,433 ± 1,243	8,666 ± 2,994	59,5
2	A.D.	5,000 ± 0,707	7,783 ± 1,530	55,7
3	A.C.	5,692 ± 0,142	9,162 ± 0,718	62,1
4	T.C.	6,083 ± 0,861	5,250 ± 1,635	–13,7
5	C.N.	7,750 ± 0,318	8,666 ± 0,516	11,8
Media		5,9916	7,9066	
Abaterea medie pătratică			1,9594	
t			2,5318 semnificativ $p < 0,05$	

Analogiile cu tremurul fiziologic *minor tremor*, făcute de unii autori au luat în considerare tremurul datorat proceselor hiperbare ca o exagerare a tremurului fiziologic, implicând atât mecanismele centrale cât şi cele periferice.

Pe timpul compresiilor s-au efectuat înregistrări EEG şi de *potenţiale evocate*[*)]. Principalele manifestări ale SNIP au constat în reducerea frecvenţei undelor, inhibarea potenţialelor evocate şi somnolenţă. Au mai fost puse în evidenţă şi tulburări psihomotorii explicabile parţial prin intensificarea tremurului, dereglări ale performanţei senzoriomotorii

[*)] Potenţial evocat: potenţial EEG pus în evidenţă prin înregistrări cu stimuli luminoşi.

şi ale funcţiilor mintale, cu afectarea memoriei de lungă durată. Totuşi, la om, simptomele sunt reversibile. Adâncimea la care apar simptomele variază invers proporţional cu viteza compresiei fiind dependentă şi de susceptibilitatea individuală programată genetic. Un element caracteristic este fenomenul de adaptare, tradus prin reducerea sau dispariţia semnelor după o perioadă de expunere la presiune. Spre exemplificare, se redă în figura 5.1 variaţia performanţei dexterităţii manuale pe timpul unei scufundări în saturaţie simulate la adâncimea de 450 m, scufundare executată în cadrul Laboratorului Hiperbar din cadrul Centrului de Scafandri Constanţa, în seria scufundărilor PONTUS, după un procedeu original.

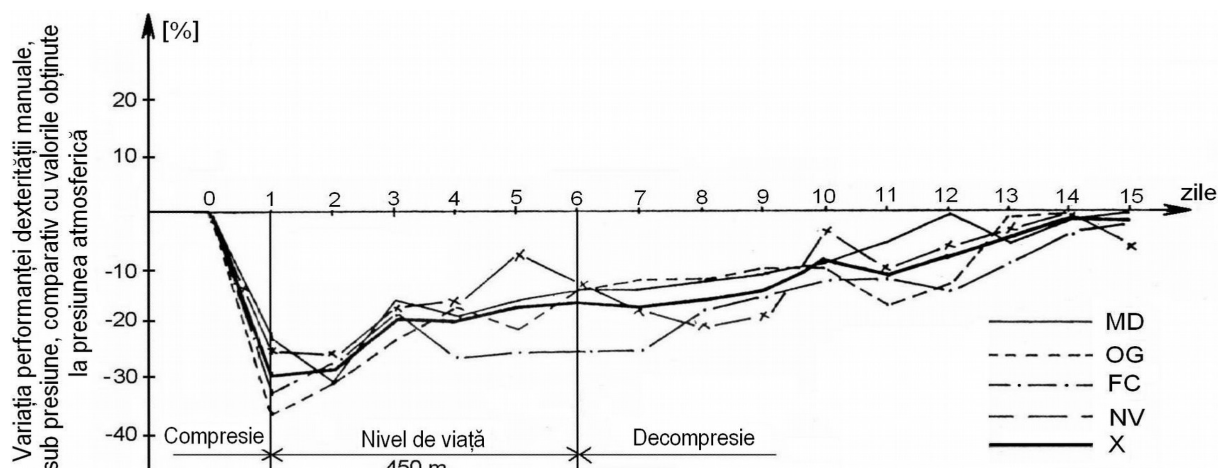


Fig. 5.1. Variaţia performanţei dexterităţii manuale pe timpul scufundării în saturaţie la 450 m adâncime, în cadrul experimentului PONTUS IV.

După Fructus, simptomele SNIP se împart în două categorii:

– *simptome clinice*: tremur, dismetrie, fasciculaţii şi convulsii musculare, somnolenţă;

– *simptome EEG*: modificări EEG, creşterea activităţii frecvenţelor teta, scăderea activităţilor frecvenţelor alfa şi beta, tulburări ale somnului.

Etiopatologia SNIP se explică printr-o serie de factori sistematizaţi de Hunter şi Bennett în factori indirecţi, în care se citează oxigenul şi dioxidul de carbon (ambii cu rol minor) şi temperatura, în special hipertermia, ca element favorizant şi în factori direcţi, în care se citează, în primul rând, fenomenele de osmoză. Conform ipotezei gradienţilor osmotici a lui Kylstra, prin compresie rapidă se creează gradienţi de saturare a gazelor inerte între ţesuturile hidrofile, rapide, cum este sângele, şi ţesuturile lente hidrofobe. Aceşti gradienţi osmotici determină deplasări de lichide între diferite compartimente cu tulburări morfofuncţionale multiple. Obiecţia principală rezidă din faptul că gradienţii osmotici se menţin scurt timp (10...20 minute), pe când simptomatologia SNIP persistă timp îndelungat. Gazele inerte pot, de asemenea, acţiona direct prin proprietăţile lor moleculare.

În cazul scufundărilor în saturaţie, expunerea organismului uman la presiunea ambiantă nu depinde decât de valoarea acesteia, ţinând cont de faptul că timpul de expunere la presiune este suficient de mare pentru ca toate ţesuturile organismului să se satureze cu gazul inert din amestecul respirator.

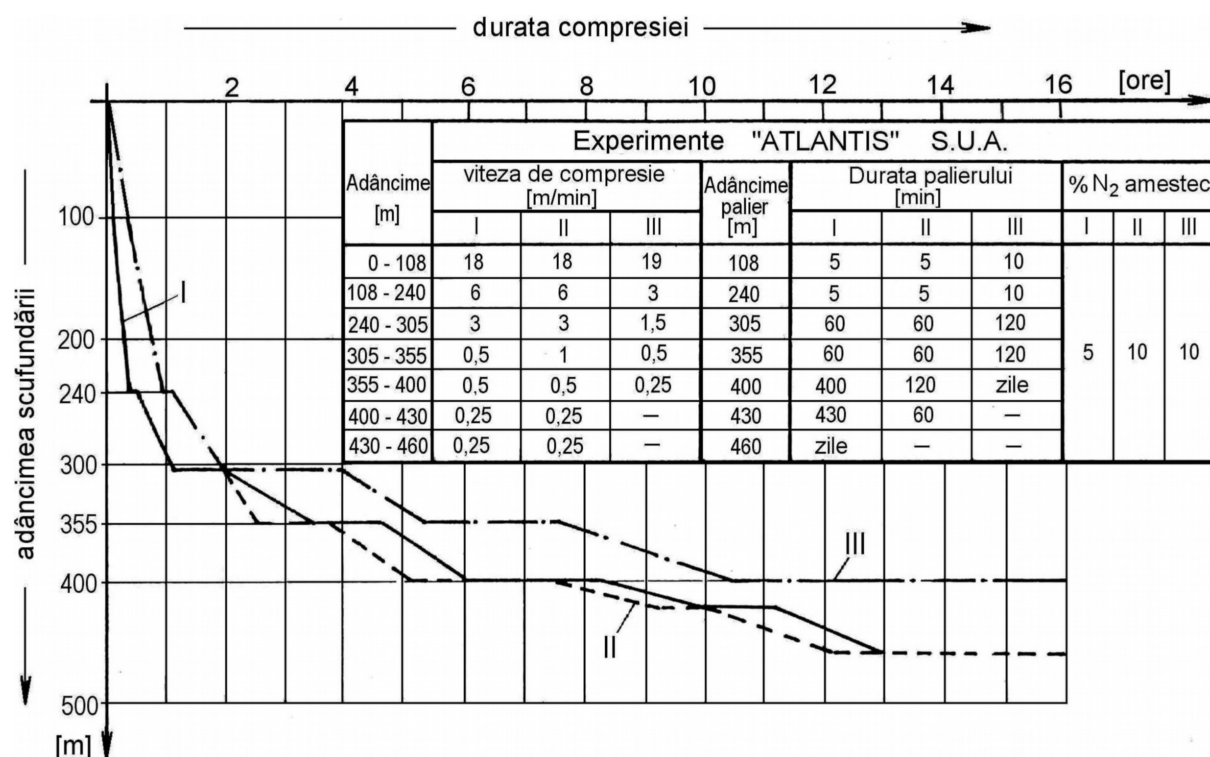
Studii asupra valorii vitezei de compresie în scufundări în saturație la adâncimi mari, cu amestecuri respiratorii sintetice binare (HELIOX) sau ternare (TRIMIX) au fost efectuate de către cercetători americani şi francezi în experimentele ATLANTIS şi respectiv CORAZ (fig. 5.2). Alături de acestea se înscriu şi experimentările efectuate la Laboratorul Hiperbar din Constanța în cadrul seriei de scufundări profunde PONTUS (fig. 5.3). Profilele acestor compresii sunt prezentate în figurile 5.4, 5.5. şi 5.6.



Fig. 5.2. Scafandri francezi în timpul unei scufundări experimentale din programul CORAZ.



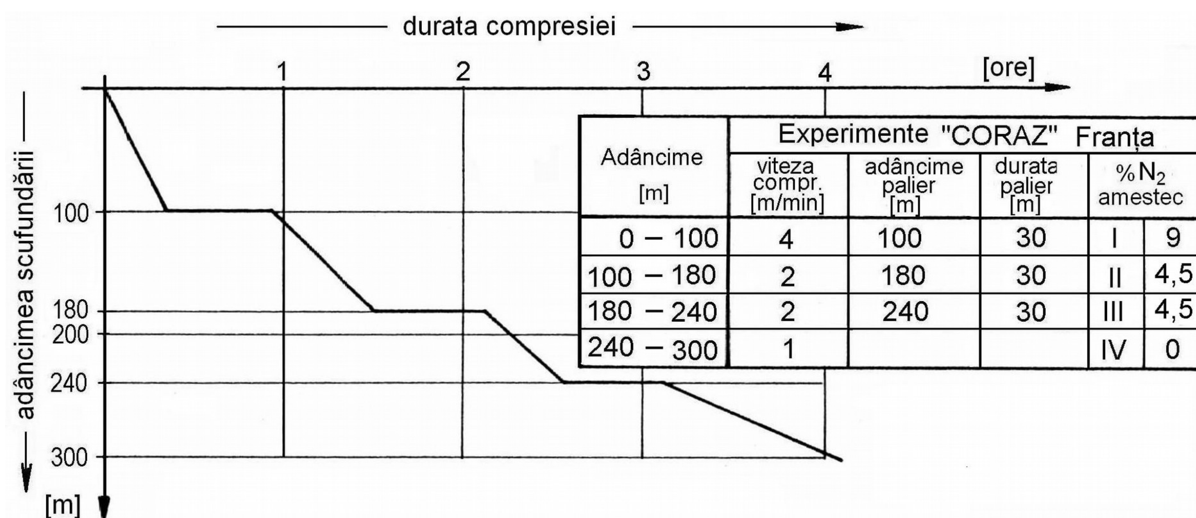
Fig. 5.3. Interiorul unei barocamere aparținând sistemului de scufundare din cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța.



Adâncime [m]	viteza de compresie [m/min] I	II	III	Adâncime palier [m]	Durata palierului [min] I	II	III	% N_2 amestec I	II	III
0 - 108	18	18	19	108	5	5	10	5	10	10
108 - 240	6	6	3	240	5	5	10			
240 - 305	3	3	1,5	305	60	60	120			
305 - 355	0,5	1	0,5	355	60	60	120			
355 - 400	0,5	0,5	0,25	400	400	120	zile			
400 - 430	0,25	0,25	—	430	430	60	—			
430 - 460	0,25	0,25	—	460	zile	—	—			

Experimente "ATLANTIS" S.U.A.

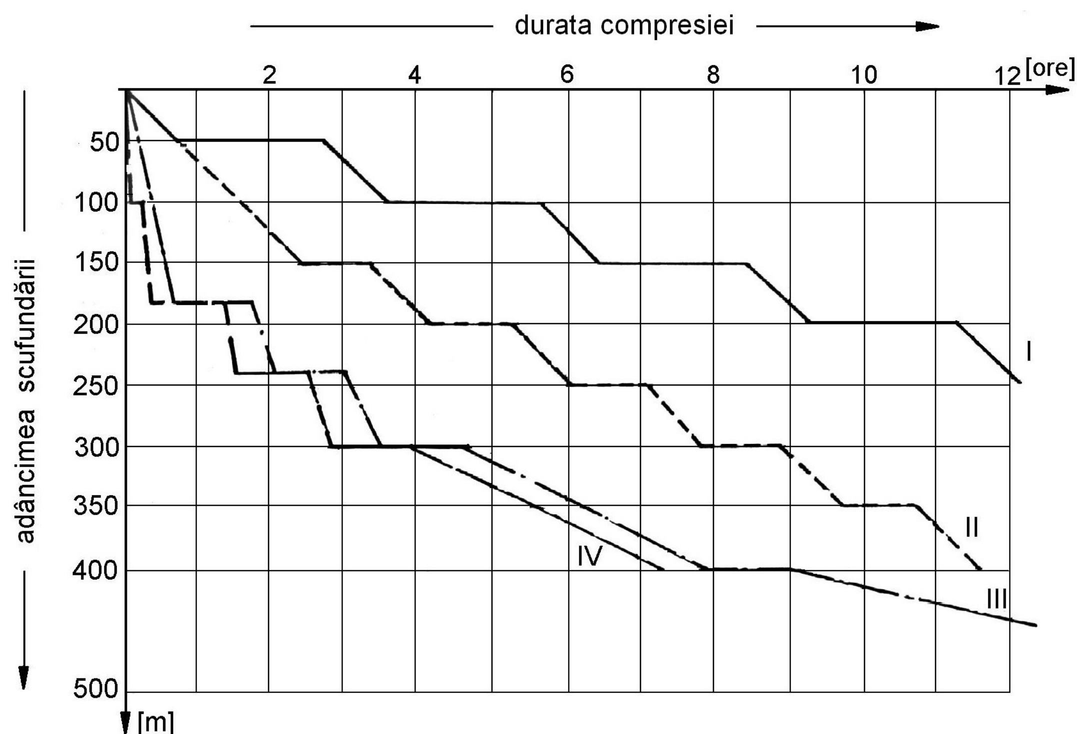
Fig. 5.4. Profilul compresiilor în seria scufundărilor ATLANTIS.



Adâncime [m]	viteza compr. [m/min]	adâncime palier [m]	durata palier [m]	% N_2 amestec	
0 — 100	4	100	30	I	9
100 — 180	2	180	30	II	4,5
180 — 240	2	240	30	III	4,5
240 — 300	1			IV	0

Experimente "CORAZ" Franța

Fig. 5.5. Profilul compresiei în seria scufundărilor CORAZ.



Adâncime [m]	Experimente "PONTUS" România												
	vit. compr. [m/min]				paliere [m]				durata palier [min]				% N_2 amestec
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
0 - 100	1	1	4	20	50	150	180	100	120	60	60	60	
100 - 180	1	1	4	8	100	200	240	180	120	60	60	60	
180 - 240	1	1	3	6	150	250	300	240	120	60	60	60	4,5
240 - 300		1	2	3	200	300	400	300	120	60	60	60	
300 - 400		1	0,5	0,5		350				60			
400 - 500				0,25									

Fig. 5.6. Profilul compresiilor în seria scufundărilor PONTUS, efectuate la Laboratorul Hiperbar din Constanța (România).

Experimentările au fost efectuate cu amestecuri respiratorii ternare, heliu-azot-oxigen (TRIMIX), în care concentrația azotului a variat între 5% şi 10% ($r_{N_2} = 0,05...0,10$) în cazul experimentelor ATLANTIS şi între 0% şi 9% ($r_{N_2} = 0,00...0,09$) în cazul experimentelor CORAZ, pentru a se stabili corelația între aceasta şi viteza compresiei în vederea ameliorării SNIP. În seria ATLANTIS unde, până la 300 m adâncime, vitezele compresiei au fost de două ori mai mari decât în experimentele CORAZ şi PONTUS s-au generat la scafandri stări de vomă, oboseală, tremur şi alte semne ale SNIP care au fost evidențiate la sosirea la adâncimea (presiunea) de lucru, dar ameliorate către ziua a doua. Acesta pare a fi motivul pentru care cercetătorii americani au concluzionat că adaosul de 5% azot ($r_{N_2} = 0,05$) în amestecul respirator HELIOX, rezultând astfel un amestec TRIMIX, nu satisface pentru prevenirea SNIP. Cert este că s-a demonstrat, în toate celelalte experimente, că introducerea azotului în amestecul respirator diminuează "deterioararea" performanțelor psihomotorii datorate vitezei de compresie şi facilitează acomodarea după o perioadă relativ scurtă la adâncimea de lucru, ceea ce nu realizează un amestec binar HELIOX.

În tabelul 5.4 sunt prezentate variațiile medii ale vitezelor de compresie, funcție de adâncime, în experimentele ATLANTIS, CORAZ şi PONTUS. Se remarcă faptul că asupra valorilor vitezei de compresie părerile sunt destul de diferite cu cât adâncimile sunt mai mici. La adâncimi mari, peste 240 m, coeficientul de variație a mediei vitezelor de compresie scade sub 50%.

Tabelul 5.4

Variația vitezelor medii de compresie funcție de adâncime, în experimentele ATLANTIS, CORAZ şi PONTUS

Intervalul de adâncimi [m]	Viteza medie a compresiei [m/min]	Coeficientul de variație a mediei [%]
0...100	9,4 ± 8,1	86
100...180	3,9 ± 2,6	67
180...240	3,5 ± 2,2	63
240...300	2,1 ± 0,9	43
300...400	0,6 ± 0,25	42
400...500	0,25	0

În cazul scufundărilor în saturație la adâncimi de peste 180 m, sau chiar şi în cazul scufundărilor unitare profunde, se poate preciza faptul că, datorită gamei largi a vitezelor de compresie utilizate precum şi a unei game reduse de amestecuri respiratorii testate, nu s-a ajuns încă la o tehnologie de compresie cât mai apropiată de ideal, pentru a avea la adâncimea de lucru scafandri apți pentru intervenții imediate.

Studiind profilele experimentărilor efectuate, se remarcă faptul că, pe timpul compresiei, la anumite adâncimi, au fost efectuate paliere cu durate diferite, care au permis atât odihna scafandrilor cât şi efectuarea unor serii de teste pentru aprecierea performanțelor psihomotorii. Cert este faptul că aceste paliere contribuie la ameliorarea SNIP şi trebuie luate în considerare când se fac recomandări privind modul în care să se realizeze o compresie rapidă spre adâncimi mari. Din numeroasele determinări realizate în scufundările profunde efectuate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța, a rezultat că nu trebuie neglijată performanța umană, motiv pentru care s-a pus la punct un test pentru scufundări profunde ce constă în executarea unei scufundări la 180 m adâncime cu viteza de compresie 10...18 m/min şi efectuarea unei serii de teste ce constau din investigații EEG şi de tremur postural. În urma cercetărilor efectuate s-a stabilit că, pentru scufundări profunde, pot fi acceptați scafandri la care variația amplitudinii tremurului postural nu depăşeşte +80% față de tremurul prelevat la presiunea atmosferică şi ale căror unde EEG lente (1...4 Hz) nu depăşesc 35%.

În tabelul 5.5 sunt prezentate vitezele de compresie şi palierele recomandate de **L**aboratorul **H**iperbar din Constanța (**L.H.**) pentru scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii HELIOX. În conformitate cu procedeul de compresie propus, au fost efectuate trei scufundări în saturație între 200 m şi 250 m adâncime, cu scafandri testați în prealabil. Înainte de scufundare şi imediat după sosirea la adâncimea maximă, au fost efectuate serii de teste care au constat în înregistrări EEG, teste de narcoză şi psihometrice. Adâncimile maxime au fost atinse în 1...1,5 ore fără să se constate "deteriorări" ale performanțelor psihomotorii, iar analiza undelor EEG nu a evidențiat modificări semnificative.

Tabelul 5.5

Vitezele de compresie şi palierele recomandate de Laboratorul Hiperbar din Constanța pentru scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii HELIOX

Intervalul de adâncimi [m]	Viteza compresiei [m/min]	Paliere [%]
0...100	10	15
100...240	4	30
240...300	2	30
300...400	0,5	60
400...500	0,25	

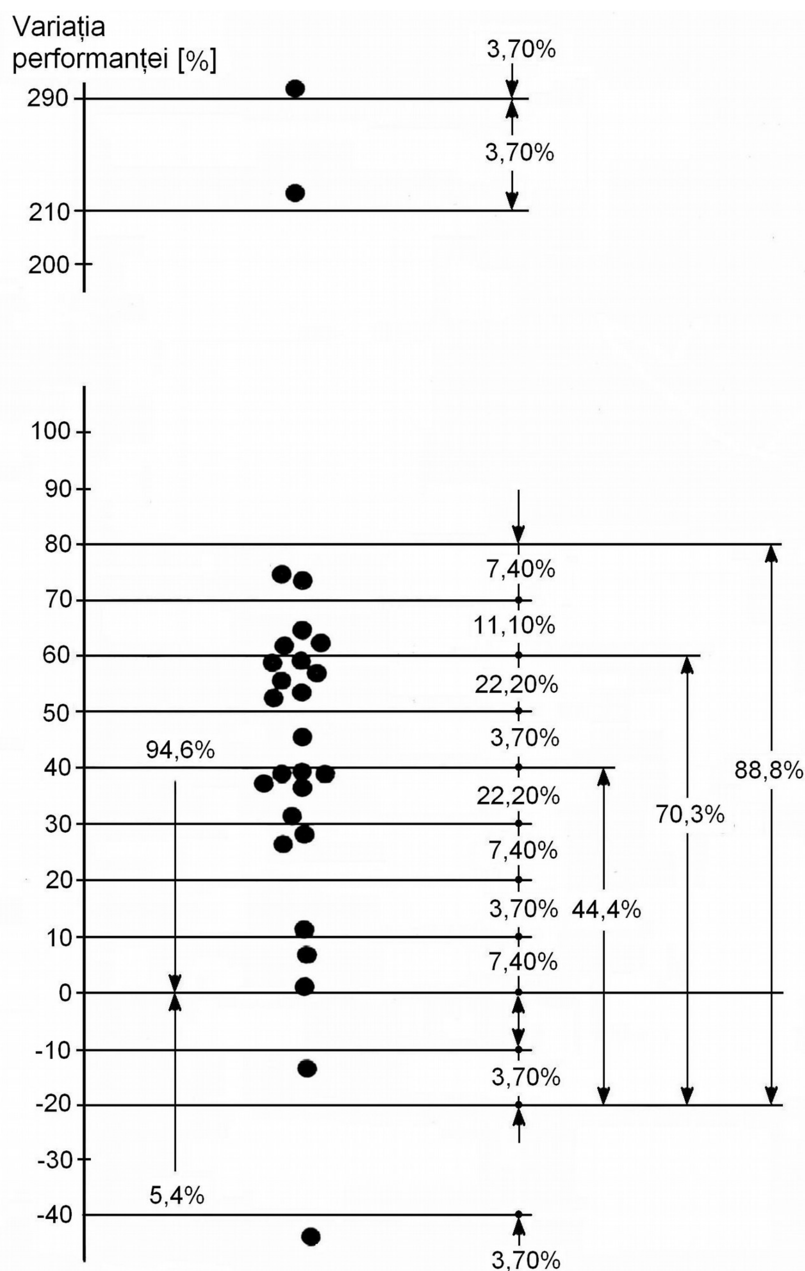


Fig. 5.7. Variația performanței tremurului postural după compresii rapide la adâncimea de 180 m.

În figura 5.7 este prezentată variația performanțelor tremurului postural după compresii rapide la 180 m adâncime, care a stat la baza definirii testului de aptitudine. Procentele sunt date din numărul total de subiecți testați (tab. 5.1, 5.2 şi 5.3).

Pentru scufundări în saturație la adâncimi mici, vitezele de compresie pot fi alese funcție de natura intervenției şi a amestecului respirator, astfel încât scafandrul să poată interveni sub apă în condiții optime. Din practica LH, pentru scufundări în saturație cu amestecuri NITROX până la 50...70 m adâncime nu este necesară o viteză de compresie mai mare de 1 m/min.

Calculul gradului de expunere a organismului uman la presiunea ambiantă presupune determinarea presiunii gazului sau a gazelor inerte dizolvate în țesuturile acestuia. Pentru aceasta, organismul uman a fost împărțit în compartimente de țesuturi cărora li s-a atribuit o perioadă de semisaturație. Compartimentele de țesuturi reprezentative au fost stabilite pe cale experimentală.

5.2.2. CALCULUL GRADULUI DE SATURARE A ȚESUTURILOR ORGANISMULUI UMAN PE TIMPUL EXPUNERILOR ÎN CADRUL PROCESELOR HIPERBARE

Calculul gradului de saturare a țesuturilor organismului uman pe timpul expunerii în cadrul proceselor hiperbare se efectuează numai pentru determinarea procedeelor de decompresie după scufundări unitare. În calculul procedeelor de decompresie după scufundări în saturație se porneşte de la faptul că toate țesuturile organismului sunt saturate în gaz inert, iar pentru determinarea procedeelor de decompresie este suficient să se ia în calcul compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație cea mai mare.

Pentru calculul presiunii gazului inert dizolvat în țesuturi pe timpul expunerii în cadrul proceselor hiperbare se folosesc, în ordine, următoarele mărimi:

r_{gi} este participația volumică a gazului inert din amestecul respirator; pentru aer $r_{gi} = r_{N_2} = 0,80\,[-]$;

H este perioada de semisaturație a compartimentelor de țesuturi [min].

Pentru tabelele de decompresie după scufundări cu aer calculate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța, compartimentele de țesuturi alese au fost cele cărora le-au corespuns următoarele perioade de semisaturație *H*: 10, 20, 40, 60, 80 şi 120 minute.

În prima etapă de calcul trebuie să se determine presiunea totală a gazului inert dizolvat în țesuturi la adâncimea maximă h_{abs} după timpul de expunere *t*. În acest scop, se notează următoarele date ale problemei:

h este adâncimea scufundării [m];

p_h este presiunea absolută corespunzătoare adâncimii de scufundare h_{abs}, [bar (sc. abs.)];

p_{hgi} este presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator la adâncimea de scufundare h_{abs}, [bar (sc. abs.)]:

$$p_{hgi} = r_{gi}\, p_h; \tag{5-1}$$

t este timpul de expunere a organismului uman la presiunea ambiantă [min].

Fiind cunoscute aceste date impuse de activitatea subacvatică, pentru fiecare compartiment de ţesuturi al modelului matematic al organismului uman se notează şi se calculează următoarele mărimi:

p_{gi} este presiunea parţială a gazului inert din amestecul respirator înainte de începerea compresiei (la presiunea atmosferică p_{at} sau înainte de scufundare); pentru aer la presiunea atmosferică:

$p_{gi} = p_{at}\, r_{N2} = 1 \cdot 0{,}80 = 0{,}80\ [\text{bar (sc. abs.)}] = 800\ \text{mbar (sc. abs)}$;

F este fracţiunea de gaz dizolvată în ţesuturi după timpul de expunere t; valoarea lui F se calculează cu relaţia:

$$F = 1 - 0{,}5^{u}, \tag{5-2}$$

unde $u = t / H$;

Δp_{gi} este diferenţa dintre presiunea parţială a gazului inert din amestecul respirator la presiunea absolută corespunzătoare adâncimii de scufundare p_{hgi} şi presiunea parţială a aceluiaşi gaz din amestecul respirator la presiunea amosferică p_{gi} :

$$\Delta p_{gi} = p_{hgi} - p_{gi}\ [\text{bar (sc. abs.)}]; \tag{5-3}$$

p_t este presiunea gazului inert dizolvat într-un ţesut la timpul t:

$$p_t = F\, \Delta p_{gi}\ [\text{bar (sc. abs.)}]; \tag{5-4}$$

p_{ht} este presiunea totală a gazului inert dizolvat într-un ţesut la presiunea absolută corespunzătoare adâncimii de scufundare, după timpul t de expunere:

$$p_{ht} = p_t + p_{gi}\ [\text{bar (sc. abs.)}]. \tag{5-5}$$

Tabelul 5.6

Calculul mărimilor specifice expunerii organismului uman timp de 60 minute la o presiune corespunzătoare adâncimii de 30 m cu amestec respirator aer

r_{gi} = 0,80	h [m]	30
	p_h [bar (sc. abs.)]	4
	p_{hgi} [bar (sc. abs.)]	3,2
	t [min]	60

H = 10 min	u [-]	6
	F [-]	0,985
	Δp_{gi} [bar]	2,4
	p_{gi} [bar (sc. abs.)]	0,80
	p_t [bar (sc. abs.)]	2,364
	p_{ht} [bar (sc. abs.)]	3,164

H = 20 min	u	3
	F	0,874
	Δp_{gi}	2,4
	p_{gi}	0,80
	p_t	2,097
	p_{ht}	2,897

H = 40 min	u	1,5
	F	0,646
	Δp_{gi}	2,4
	p_{gi}	0,80
	p_t	1,550
	p_{ht}	2,350

H = 80 min	u	0,75
	F	0,405
	Δp_{gi}	2,4
	p_{gi}	0,80
	p_t	0,972
	p_{ht}	1,772

Pentru buna organizare a calculului, acesta se ordonează în fişe speciale. Se prezintă, pentru exemplificare, calculul gradului de saturare a compartimentelor de țesuturi, conform modelului matematic prezentat, în cazul unei scufundări la adâncimea de $h = 30$ m, cu timp de expunere la presiune $t = 60$ minute, în care, ca amestec respirator s-a folosit aer comprimat $(r_{gi} = r_{N_2} = 0,8)$. Calculul este prezentat în tabelul 5.6.

Din analizarea tabelului 5.6 se observă diferențierea în ceea ce priveşte gradul de saturare a diferitelor compartimente de țesuturi conform modelului matematic prezentat, de la o valoare a presiunii totale a gazului inert dizolvat $p_{ht} = 3,164$ bar (sc. abs.) pentru compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație H = 10 minute, la valoarea $p_{ht} = 1,772$ bar (sc. abs.) pentru compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație H = 80 minute.

5.3. REVENIREA LA PRESIUNEA ATMOSFERICĂ. DECOMPRESIA

Revenirea la presiunea atmosferică (decompresia) este acea parte a scufundării prin care scafandrul este readus la suprafața apei (la presiunea atmosferică). Viteza decompresiei este dată de viteza de eliminare a gazului inert dizolvat în țesuturile organismului pe timpul expunerii acestuia proceselor hiperbare.

5.3.1. MODELE MATEMATICE PENTRU CALCULUL PROCEDEELOR DE DECOMPRESIE

Pe timpul expunerii organismului uman la presiune (etapele scufundării reprezentând compresia şi lucrul în imersiune) gazul inert se dizolvă în țesuturi. Acest fenomen este funcție de presiune, temperatură, durata expunerii la presiune şi natura gazului inert din amestecul respirator. Timpul în care presiunea gazului dizolvat într-un lichid, la temperatură constantă, atinge o valoare situată la jumătatea intervalului cuprins între presiunea gazului dizolvat la momentul inițial p_0 şi presiunea gazului la care este expus p_i, reprezintă *perioada de semisaturație a lichidului* respectiv *H*. Deci, *H* este timpul de expunere corespunzător atingerii de către gazul dizolvat a unei presiuni egale cu $p_0 + (p_i - p_0)/2 = (p_i + p_0)/2$ aşa după cum se arată în figura 5.8.

În cazul țesuturilor umane, pentru calculul expunerii organismului la presiune precum şi a procedeelor de decompresie, s-au stabilit compartimente de țesuturi cărora li s-au atribuit, în mod arbitrar, perioade de semisaturație, realizându-se astfel un model matematic de calcul.

Procesele de saturație şi desaturație ce au loc pe timpul activităților de pătrundere a omului sub apă trebuie privite în mod unitar. Pentru exemplificare, în figura 5.9 este prezentat profilul unei scufundări unitare la adâncimea corespunzătoare presiunii $p_h = 6\,\text{bar}$ (sc. abs.), cu un timp de expunere la presiune de 21 minute şi procesele de saturare–desaturare ce au loc în compartimentele de țesuturi cu perioadele de semisaturație H = 5, 10, 20 şi 40 minute.

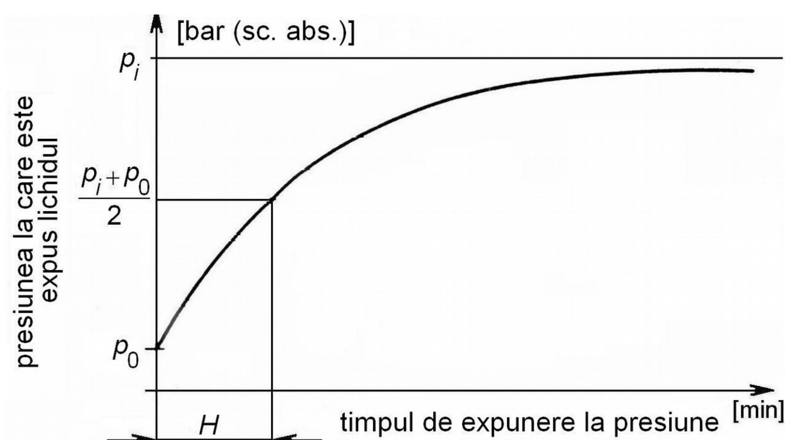


Fig. 5.8. Perioada de semisaturație *H* a unui lichid expus la presiunea p_i, la temperatură constantă.

Dizolvarea gazului inert în cadrul proceselor hiperbare specifice pătrunderii omului sub apă este mai mult sau mai puțin completă, funcție de durata expunerii. Astfel, pentru scufundări unitare, numai o parte dintre țesuturi, definite ca țesuturi rapide, se saturează cu gaz inert pe când celelalte, definite ca țesuturi lente, ating o presiune de gaz dizolvat mai mică decât presiunea parțială a gazului inert la care a fost expus organismul (fig. 5.9). Pentru scufundări în saturație, scufundări cu expuneri de lungă durată, se poate considera că toate țesuturile organismului se saturează cu gazul inert din compunerea amestecului respirator, iar pentru calculul decompresiei se ia în considerare numai compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație *H* cea mai mare sau un anumit compartiment de țesuturi numit *compartiment de țesuturi director.*

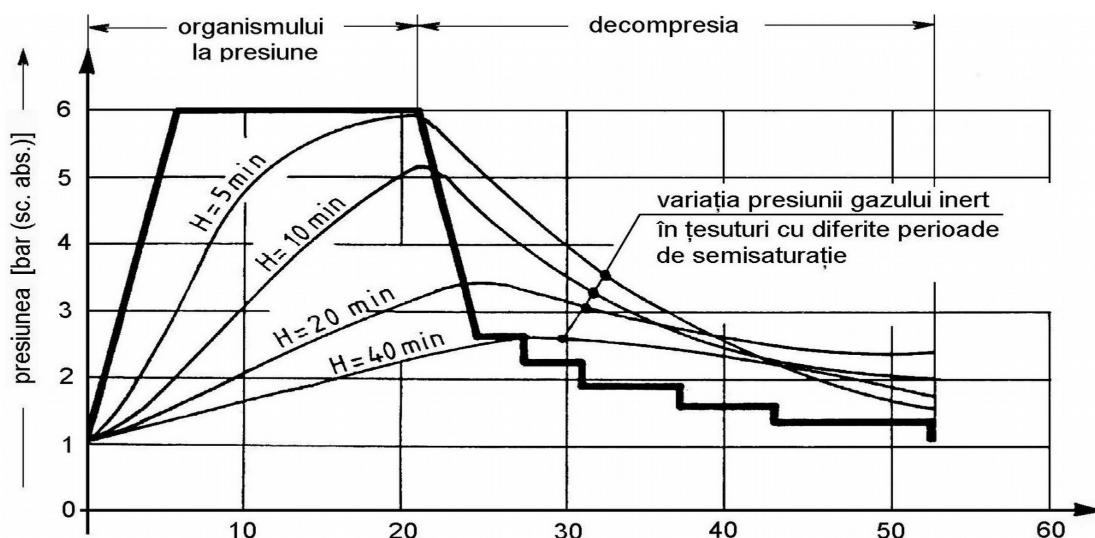


Fig. 5.9. Procesele de saturație şi desaturație pe timpul unei scufundări unitare executată la adâncimea corespunzătoare presiunii de 6 bar (sc. abs.) şi cu un timp de expunere la presiune de 21 minute (compresia şi lucrul în imersiune).

În continuare, se prezintă câteva modele matematice folosite pentru calculul procedeelor de decompresie. Procedeul de decompresie, ce se materializează printr-o tabelă de decompresie, trebuie să cuprindă informații privind: adâncimea scufundării,

durata scufundării sau timpul de expunere a scafandrului la presiune, palierele de decompresie şi duratele acestora.

5.3.1.1. Modelul "suprasaturație multi-țesut"

Modelul matematic *suprasaturație multi-țesut* a fost propus pentru prima dată de Haldane. Suprasaturația se referă la starea țesuturilor organismului la decompresie (după scăderea relativ rapidă a presiunii ambiante) când presiunea gazului inert dizolvat devine mai mare decât presiunea parțială a aceluiaşi gaz din amestecul respirator. Noțiunea de multi-țesut se referă la complexitatea organismului uman.

Pentru calculul presiunii gazului inert dizolvat într-un fluid, se pleacă de la ipoteza lui Haldane: viteza de variație a presiunii gazului dizolvat într-un lichid este proporțională cu diferența dintre valoarea presiunii parțiale a gazului inert din amestecul respirator şi presiunea gazului dizolvat:

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} = \lambda(p_i - p) \quad \text{sau} \quad \frac{\mathrm{d}p}{p_i - p} = \lambda\,\mathrm{d}t\,, \tag{5-6}$$

unde: p_i este presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator;

p – presiunea gazului inert dizolvat în țesuturi;

λ – o constantă caracteristică suprafeței de separare şi formei ocupate de lichid sau țesut.

Se notează:

$$p_i - p = u\,; \quad \mathrm{d}p = -\,\mathrm{d}u\,; \quad -\frac{\mathrm{d}u}{u} = \lambda\,\mathrm{d}t\,. \tag{5-7}$$

Integrând se obține succesiv:

$$\int\frac{\mathrm{d}u}{u} = -\lambda\int\mathrm{d}t + C\,,$$

$$\ln u = -\lambda t + \ln k\,,$$

unde

$$C = \ln k\,,$$

$$\ln\frac{u}{k} = -\lambda t\,,$$

sau

$$\exp\left(\ln\frac{u}{k}\right) = \exp(-\lambda t)\,,$$

de unde:

$$\frac{u}{k} = \exp(-\lambda t)$$

şi deci:

$$u = k\exp(-\lambda t)\,. \tag{5-8}$$

Înlocuind în relația (5-7) expresia lui u se obține:

$$p_i - p = k\exp(-\lambda t)$$

sau

$$p = p_i - k\exp(-\lambda t) \qquad (5\text{-}9)$$

cu

$$k = p_i - p_0, \qquad (5\text{-}10)$$

unde p_0 este presiunea gazului inert dizolvat într-un lichid la timpul $t = 0$.

Se obține astfel:

$$p = p_i - (p_i - p_0)\exp(-\lambda t),$$

care se mai poate scrie:

$$p = p_i - p_i\exp(-\lambda t) + p_0\exp(-\lambda t) + p_0 - p_0, \qquad (5\text{-}11)$$

de unde:

$$p = p_0 + (p_i - p_0)\left[1 - \exp(-\lambda t)\right], \qquad (5\text{-}12)$$

care reprezintă presiunea gazului inert dizolvat la momentul t, în lichidele şi țesuturile organismului.

Aşa cum s-a arătat mai sus, pentru țesuturile umane, se atribuie acestora, în mod arbitrar, o perioadă de semisaturație. După Workman, pentru calculul procedeelor de decompresie se pot lua în considerare compartimente de țesuturi cărora le corespund perioadele de semisaturație H de 5, 10, 20, 40, 80 şi 120 minute. Aceste compartimente se iau în calcul când este vorba de scufundări unitare autonome la adâncimi de până la 60 m. Pentru adâncimi mai mari sau pentru timpi de expunere la presiune mai lungi, trebuie luate în calcul şi compartimente de țesuturi cu perioade de semisaturație H de 160, 200 şi chiar 240 minute. Acest ultim tip de eşantion este suficient pentru calculul procedeelor de decompresie după scufundări unitare de sistem până la adâncimea de 180 m.

După Jones, perioadele de semisaturație H ale compartimentelor de țesuturi sunt cuprinse între 1,5 minute şi 300 minute. Jones recomandă pentru calculul procedeelor de decompresie compartimentele de țesuturi cărora le-a atribuit perioadele de semisaturație H de 1,5; 7,9; 29; 120 şi 300 minute, care corespund unor curbe exponențiale determinate experimental. Cel mai rapid compartiment de țesuturi, cu perioada de semisaturație $H = 1{,}5$ minute, nu intervine în calcul şi, o decompresie cu viteza de 15...17 m/min, elimină influența sa. Compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație $H = 300$ minute nu este afectat în cazul scufundărilor unitare autonome, dar din calculul procedeelor de decompresie nu pot fi înlăturate compartimentele intermediare cu perioade de semisaturație H de 60 minute şi chiar 80 minute.

Modelul matematic folosit în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța pentru calculul procedeelor de decompresie după scufundări unitare autonome a cuprins compartimentele de țesuturi cu perioade de semisaturație H de 10, 20, 40, 60, 80 şi 120 minute. În tabelul 5.7 şi în figura 5.10 sunt prezentați timpii de expunere la

presiune necesari pentru saturarea cu gaz inert a diferitelor compartimente de țesuturi caracterizate de perioada lor de semisaturație *H*.

Tabelul 5.7

Timpii de saturare a compartimentelor de țesuturi caracterizate de o perioadă de semisaturație *H*, folosiți în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța pentru calculul procedeelor de decompresie

Perioada de semisaturație a compartimentului *H* [min]	Procente de saturație [%]								
	50	75	87,5	93,75	96,875	98,43	99,22	99,61	99,81
	(ore.minute)								
10	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	1.00	1.10	1.20	1.30
20	0.20	0.40	1.00	1.20	1.40	2.00	2.20	2.40	3.00
40	0.40	1.20	2.00	2.40	3.20	4.00	4.40	5.20	6.00
60	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00
80	1.20	2.40	4.00	5.20	6.40	8.00	9.20	10.40	12.00
120	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00
160	2.40	5.20	8.00	10.40	13.20	16.00	18.40	21.20	24.00
200	3.20	6.40	10.00	13.20	16.40	20.00	23.20	26.40	30.00
240	4.00	8.00	12.00	16.00	20.00	24.00	28.00	32.00	36.00

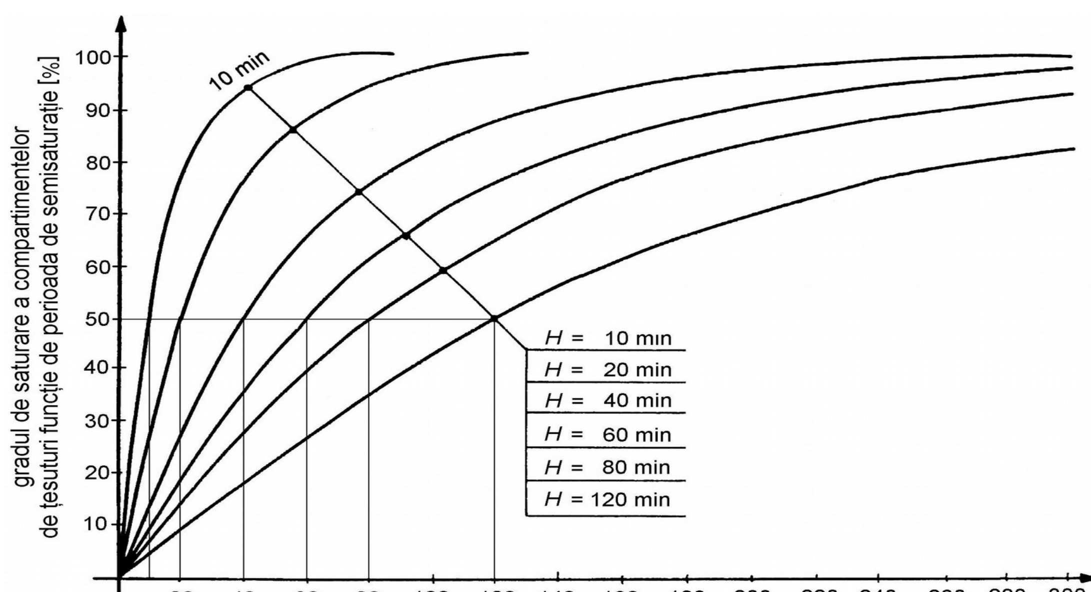


Fig. 5.10. Curbele exponențiale de saturație corespunzătoare compartimentelor de țesuturi folosite în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța la calculul procedeelor de decompresie după scufundări unitare autonome.

Din datele prezentate în tabelul 5.7 se observă că după o oră, compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație *H* =10 minute este saturat cu gaz inert în proporție de 98,43%, cel cu perioada de semisaturație *H* =20 minute în proporție de 87,5%, iar cel cu perioada de semisaturație *H* =60 minute în proporție de 50%. Această constatare este foarte importantă pentru calculul procedeelor de decompresie, putându-se determina în orice moment raportul saturării diferitelor compartimente de țesuturi față de presiunea de referință.

Se poate considera că un compartiment de țesuturi este saturat cu gazul inert din amestecul respirator inhalat sub presiune atunci când raportul dintre durata de expunere şi perioada de semisaturație este $t/H = 6$. Spre exemplu, un compartiment de țesuturi cu perioada de semisaturație $H = 300$ minute se saturează după 300 × 6 = 1800 minute, adică după 30 ore de expunere la presiune.

Revenind la relația (5-12) se va nota:

$$F = 1 - \exp(-\lambda t), \tag{5-13}$$

ceea ce reprezintă, la momentul *t*, fracțiunea de gaz inert din diferența de presiune dintre presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator şi presiunea aceluiaşi gaz dizolvat în țesuturi.

Dacă se ia în considerare, prin definiție (fig. 5.8) că la atingerea timpului corespunzător perioadei de semisaturație fracțiunea de gaz inert dizolvat în țesuturi este la jumătate, se poate scrie:

$$F = 1 - \exp(-\lambda H) = \frac{1}{2}, \tag{5-14}$$

unde H este perioada de semisaturație a compartimentului de țesuturi [min].

Din relația (5-14) rezultă expresia:

$$\exp(-\lambda H) = \frac{1}{2}$$

căreia aplicându-i logaritmii se obține:

$$\ln\left[\exp(-\lambda H)\right] = \ln\frac{1}{2},$$

sau

$$\lambda H = 0{,}693,$$

de unde rezultă expresia lui λ funcție de H:

$$\lambda = \frac{0{,}693}{H}. \tag{5-15}$$

Înlocuind expresia lui λ în relația (5-13) se obține:

$$F = 1 - \exp\left(-0{,}693\frac{t}{H}\right),$$

dar ținând cont că

$$\exp(-0{,}693) = 0{,}5$$

şi dacă se notează

$$\frac{t}{H} = u,$$

se obține în final:

$$F = 1 - 0{,}5^{u}. \tag{5-16}$$

5.3.1.2. Modelul echilibrului de faze

Aproximarea termodinamică a lui Hills este mai complexă decât modelul "suprasaturație multi-țesut" propus de Haldane. Modelul termodinamic este bazat pe echilibrul de fază dintre gazele dizolvate şi gazele separate, perfuzia – difuzia radială a gazelor din capilare prin membranele celulelor, funcțiile exponențiale de răspuns Bessel şi punctele limită pentru separarea volumelor de gaz.

Dizolvarea temporară şi eliminarea gazului inert din masa țesutului este limitată de perfuzie şi difuzie. Modelul de transport invocat este al unei zone vasculare complet saturată din care sângele venos o părăseşte în echilibru cu toate gazele, în timp ce sângele arterial nici nu diminuează nici nu înlocuieşte gazele dizolvate în zonă. Din zona vasculară dezvoltată, gazele difuzează în zona celulară. Pentru simplificare, zona dezvoltată se presupune simetrică, cilindrică şi unidimensională, aşa cum este prezentată în figura 5.11. Ecuația radială a difuziei gazului inert în materialul celular se poate scrie sub forma:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r}=\frac{1}{D}\frac{\partial p}{\partial t}. \qquad (5\text{-}17)$$

Separând variabilele pentru constanta ε^2 de separare, aplicând condițiile inițiale:

pentru $t=0$, $p=p_0$

şi condițiile la limită:

la $r=a$, $p=p_i$

la $r=b$, $\frac{p}{r}=0$

şi rezolvând ecuația, în cazul unei difuzii pure, se obține:

$$p-p_i=(p_0-p_i)\,E(r,t), \qquad (5\text{-}18)$$

unde

$$E(r,t)=\pi\sum_{n=1}^{\infty}\frac{J_1^2(b\,\varepsilon_n)\left[J_0(r\,\varepsilon_n)-N_0(r\,\varepsilon_n)\,J_0(a\,\varepsilon_n)\right]\exp\left(-\varepsilon_n^2 Dt\right)}{\left[J_0^2(a\,\varepsilon_n)-J_1^2(b\,\varepsilon_n)\right]}. \qquad (5\text{-}19)$$

Valorile lui ε_n sunt rădăcinile (reale şi simple) ale expresiei:

$$J_0(a\,\varepsilon_n)\,N_1(b\,\varepsilon_n)=N_0(a\,\varepsilon_n)\,J_1(b\,\varepsilon_n) \qquad (5\text{-}20)$$

unde *J* şi *N* sunt funcțiile lui Bessel şi respectiv Neumann.

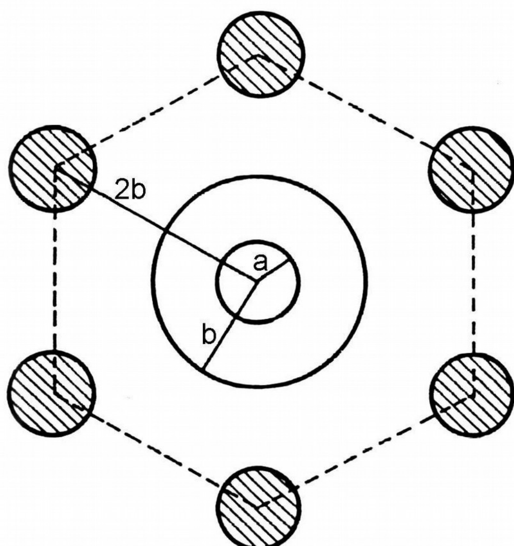


Fig. 5.11. Modelul capilarului simetric şi cilindric pentru difuzia radială.

Forma ecuației (5-18) este analogă cu ecuația (5-12) din modelul lui Haldane. Funcția de răspuns a țesutului *E*, are aceeaşi semnificație ca şi la modelul "suprasaturație multi-țesut".

5.3.2. TEORII DE DECOMPRESIE

În figura 5.12 este reprezentată variația presiunii parțiale a gazului inert funcție de timp, într-un compartiment de țesuturi cu perioada de semisaturație *H*, pe timpul decompresiei, la palierul de *t* minute, într-o ambianță cu presiunea parțială a gazului inert p_{hgi}. De menționat faptul că acest palier de decompresie începe de la o valoare a presiunii parțiale a gazului inert egală cu p_{gi} corespunzătoare primului palier sau palierului imediat imediat superior, presiunea fiind scăzută până la nivelul p_{hgi} (prin scăderea presiunii amestecului) corespunzătoare palierului în curs de desfăşurare.

Desaturarea țesutului de gaz inert dizolvat este o funcție exponențială, care se inițiază în momentul începerii scăderii presiunii, practic a ridicării spre primul sau următorul palier de decompresie şi este "întreruptă" la terminarea timpului necesar de staționare la acest palier. Întreruperea curbei de desaturare, care este asimptotică la nivelul presiunii parțiale a gazului inert din amestecul respirator ambiant p_{hgi}, se face la o valoare p_{ht} mai mică sau cel mult egală cu *presiunea maximă admisibilă a gazului inert dizolvat în compartimentul de țesuturi* p_{adm}, presiune care a fost determinată în mod empiric şi verificată experimental. Această presiune maximă admisibilă se va analiza pentru fiecare procedeu de decompresie în parte.

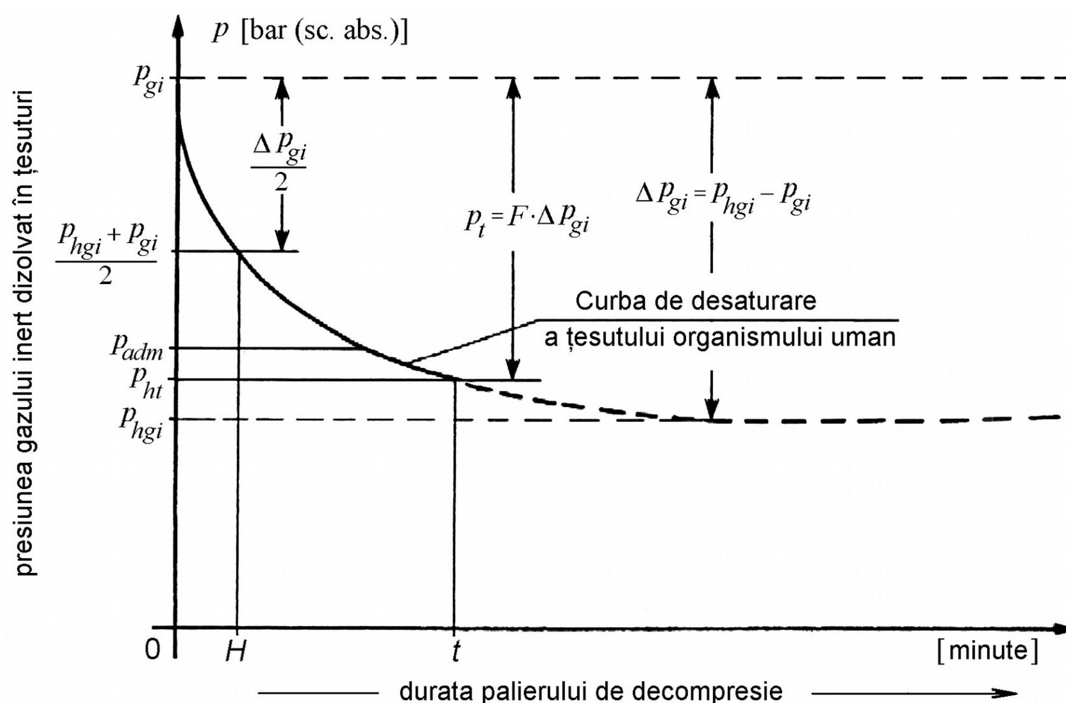


Fig. 5.12. Variația presiunii gazului inert dizolvat într-un compartiment de țesuturi cu perioada de semisaturație *H*, pe timpul decompresiei, la un palier de *t* minute.

Imediat ce începe decompresia (scăderea presiunii), apare o diferență de presiune negativă între presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator ambiant, corespunzător palierului, p_{hgi} şi presiunea aceluiaşi gaz dizolvat în țesuturi $p_{gi}(\Delta p_{gi} = p_{hgi} - p_{gi} < 0)$. Această diferență de presiune determină degazarea țesuturilor de gazul inert dizolvat după curba arătată în figura 5.12. Pe tot timpul decompresiei, o parte dintre țesuturile organismului (în cazul scufundărilor unitare) sau toate țesuturile (în cazul scufundărilor în saturație) sunt suprasaturate cu gaz inert, ceea ce înseamnă că presiunea gazului inert dizolvat în țesuturi, este mai mare decât presiunea parțială a aceluiaşi gaz din amestecul respirator ambiant. Nivelul acestei suprasaturații nu trebuie să depăşească o anumită valoare critică, deoarece se poate produce o degazare bruscă, cu formare de bule de gaz, circulante sau staționare, care pot genera accidente de scufundare mai mult sau mai puțin grave. Astfel, a fost definită noțiunea de presiune maximă admisibilă a gazului inert dizolvat în țesuturi p_{adm}.

În legătură cu acest concept, pe plan mondial sunt două tendințe. Unele şcoli de studii hiperbare folosesc noțiunea de presiune maximă admisibilă prin traducerea acesteia în *diferența de presiune admisibilă* dintre presiunea gazului inert dizolvat şi presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator. Promotorul acestei idei a fost Workman, în timp ce Haldane a folosit noțiunea de presiune maximă admisibilă prin traducerea acesteia în *coeficientul de suprasaturație critic* sau *raportul de suprasaturație critic* notat cu C_{SC} şi respectiv R_{SC}. Coeficientul (raportul) de suprasaturație critic reprezintă raportul dintre presiunea gazului inert dizolvat în țesuturile organismului uman şi presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator, astfel încât să se permită degazarea țesutului fără formarea de bule de gaz, circulante sau staționare, periculoase.

Atât diferența de presiune admisibilă cât şi coeficientul (raportul) de suprasaturație critic reprezintă rezultatul unui ansamblu de observații clinice, la început pe scafandri decomprimați după proceduri empirice, scafandri care au "plătit" prin accidente de decompresie revenirea la presiunea atmosferică. Apoi, prin analiza acestor accidente, s-a ajuns la elaborarea tabelelor de decompresie. Acest rezultat final s-a bazat şi pe informațiile obținute în experimentele pe animale.

În continuare se prezintă câteva dintre teoriile de bază privind cele două concepte de presiune admisibilă şi de coeficient (raport) de suprasaturație critic.

5.3.2.1. Teoria americană

Primele studii asupra decompresiei au necesitat experimente pe animale şi oameni, cu expuneri repetate în ambianțe hiperbare. În urma acestor studii a apărut prima metodă de calcul a decompresiei, care exprimă în procente gradul de saturare sau de desaturare a țesuturilor organismului uman supus proceselor hiperbare cu amestec respirator aer, precum şi presiunea maximă admisibilă a azotului în țesuturi, pe timpul decompresiei, astfel încât să nu se producă accidente de decompresie.

Limita aplicată pentru reducerea presiunii ambiante a fost stabilită plecând de la faptul că presiunea gazului inert dizolvat în țesuturi nu trebuie să fie mai mare decât de două ori presiunea parțială a aceluiaşi gaz din amestecul respirator. Acest raport, numit *raport de suprasaturație critic* R_{SC}, era considerat de Haldane ca fiind 2/1, deci pentru azot ar fi fost 2/1 $\times$ 0,79 = 1,58 [bar (sc. abs.)].

Se ignoră prezența oxigenului din amestecul respirator ca factor în formarea bulelor de gaz. Extinderea cercetărilor în domeniul pătrunderii omului sub apă, cu amestecuri respiratorii heliu-azot-oxigen (TRIMIX) sau cu amestecuri supraoxigenate, au confirmat absența efectului oxigenului pe timpul decompresiei.

Conceptul cu adoptarea raportului de suprasaturație critic de 2/1 nu este adecvat scufundărilor profunde sau de lungă durată.

Hawkins şi colaboratorii au arătat că raportul de 2/1 a fost prea conservativ pentru compartimentul de țesuturi rapide şi prea mare pentru compartimentul de țesuturi lente. După mii de experimentări, la adâncimi de 30 m şi 60 m, aceştia au determinat valori ale raportului de suprasaturație critic funcție de diferitele compartimente de țesuturi ale organismului, prezentate în tabelul 5.8.

Tabelul 5.8

Rapoartele de suprasaturație critice R_{SC} funcție de diferitele compartimente de țesuturi caracterizate de o anumită perioadă de semisaturație *H*

Perioada de semisaturație H [min]	Raport de suprasaturație critic R_{SC} [-]
5	5,5/1
10	4,5/1
20	3,2/1
40	2,4/1
75	1,8/1 la 2/1

În anul 1937 Yarbrough a calculat şi testat noi tabele pentru U.S. Navy controlând numai compartimentele de țesuturi cu perioade de semisaturație H de 20, 40 şi 75 minute şi folosind rapoartele de semisaturație critice prezentate în tabelul 5.9.

Tabelul 5.9

Rapoartele de suprasaturație critice R_{SC} funcție de diferitele compartimente de țesuturi caracterizate de o anumită perioadă de semisaturație H

Perioada de semisaturație H [min]	Raport de suprasaturație critic R_{SC} [-]
20	2,45/1 ... 2,8/1
40	1,75/1 ... 2,0/1
75	1,75/1 ... 2,0/1

La scufundările efectuate după aceste tabele, la 2,4% dintre cei 81 de subiecți au apărut accidente de decompresie.

Van der Aue, în anul 1951, a calculat noi tabele de decompresie pentru scufundări cu aer comprimat modificând atât eşantionul de compartimente de țesuturi cât şi rapoartele de suprasaturație critice. Datele sunt prezentate în tabelul 5.10.

Tabelul 5.10

Rapoartele de suprasaturație critice R_{SC} funcție de diferitele compartimente de țesuturi caracterizate de o anumită perioadă de semisaturație H

Perioada de semisaturație H [min]	Raport de suprasaturație critic R_{SC} [–]
5	3,8 /1
10	3,4 /1
20	2,8 /1
40	2,27/1
75	2,06/1
120	2,0 /1

Rapoartele de suprasaturație critice folosite de Workman pentru diferitele compartimente de țesuturi, la diferite adâncimi, sunt reprezentate grafic în figura 5.13.

Din figura 5.13 se observă că rapoartele de suprasaturație critice sunt funcții hiperbolice față de adâncimea scufundării (presiunea corespunzătoare acestei adâncimi). Rapoartele superioare permit grade de desaturare mai mari pentru compartimentele de țesuturi mai rapide.

Revenind la datele prezentate în tabelele 5.8, 5.9 şi 5.10 şi în figura 5.13, se remarcă modul cum a evoluat în timp concepția referitoare la modelul matematic corespunzător țesuturilor organismului uman pentru calculul procedeelor de decompresie după scufundări cu aer comprimat. Modificările au fost cerute de rezultatele experimentelor efectuate, experimente la care au avut loc accidente de decompresie la un număr mare de subiecți.

Tabelele de decompresie după scufundări cu aer comprimat ale U.S. Navy sunt valabile din anul 1960 şi au fost elaborate de U.S. Navy Experimental Diving Unit. Curba de securitate a acestor tabele este reprezentată în figura 5.14. Curba de securitate reprezintă locul geometric al tuturor punctelor, presiune funcție de timpul de expunere al organismului uman, care delimitează zona scufundărilor ce nu necesită paliere la decompresie de zona scufundărilor ce necesită paliere la decompresie.

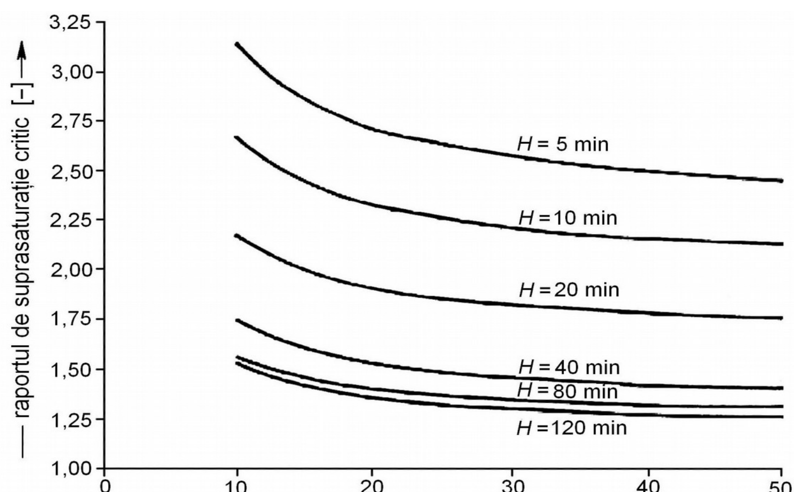


Fig. 5.13. Variația rapoartelor de suprasaturație critice funcție de adâncimea scufundării pentru diferite compartimente de țesuturi caracterizate de perioada lor de semisaturație *H*.

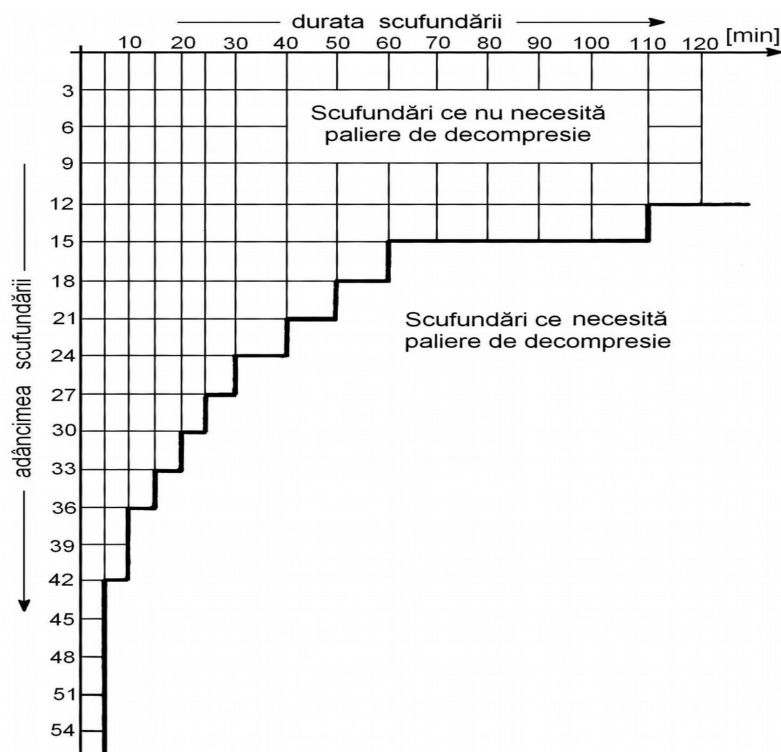


Fig. 5.14. Curba de securitate a tabelei de decompresie după scufundări cu aer U.S. Navy – 60.

5.3.2.2. Teoria britanică

Hempleman, în anul 1952, a sugerat că un calcul cu un singur compartiment de țesuturi ar fi satisfăcător pentru rezolvarea problemei decompresiei. Totuşi, datorită faptului că difuzia într-un țesut este un factor dominant în schimbul de gaz inert, se ridică probleme de ordin fiziologic interesante. Unele dintre acestea au fost reexaminate de Hempleman în 1967 şi Hills în 1966 şi reluate în 1969.

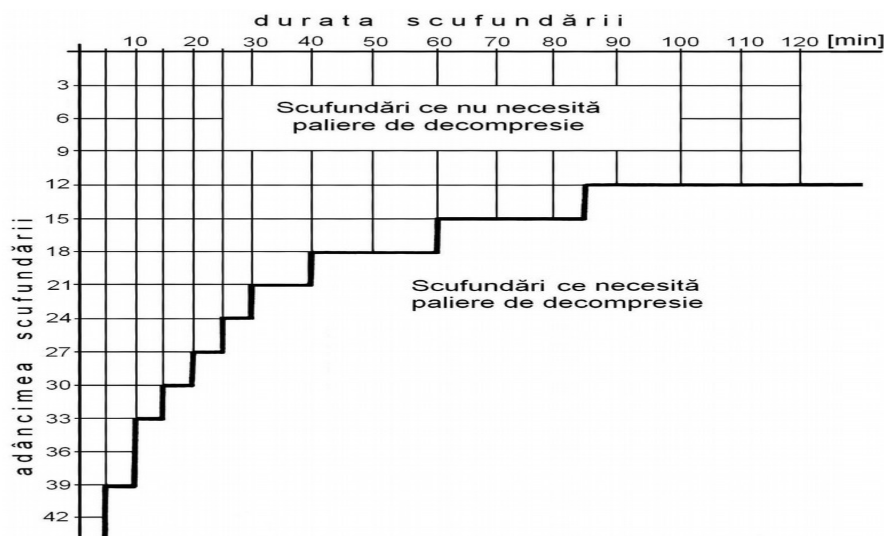


Fig. 5.15. Curba de securitate a tabelei de scufundare cu aer Royal Navy – 72.

Pentru calculul decompresiei după scufundări cu aer, cercetătorii britanici au emis o serie de ipoteze care sunt enumerate în continuare:

– există o relație directă între cantitatea de azot din amestecul respirator şi riscul accidentului de decompresie; conținutul de oxigen din amestecul respirator se consideră că nu face parte din etiologia accidentului de decompresie;

– sângele arterial se saturează instantaneu cu gaz inert;

– numai un singur compartiment de țesuturi participă la apariția accidentului de decompresie;

– viteza de pătrundere a gazului inert în țesuturi, pe timpul expunerii la presiune, este mai mică decât viteza cu care îl părăseşte pe timpul decompresiei;

– țesuturile pot tolera o anumită presiune de gaz inert dizolvat, în exces.

Aceste aproximări cantitative au definit algoritmul de calcul a tabelei de decompresie după scufundări cu aer comprimat. Pentru timpi de expunere la presiune sub 100 minute s-a stabilit cantitatea de gaz inert ce va fi difuzat în compartimentele de țesuturi Q, conform relației:

$$Q = 3{,}27\ p\sqrt{t}\,, \tag{5-21}$$

unde: p este presiunea la care este expus organismul pe timpul scufundării [ft H_2O];
t – timpul de expunere [min].

Pentru timpi de expunere mai mari de 100 minute trebuie să se revină la ecuația difuziei.

În figura 5.15 este prezentată curba de securitate a tabelei de decompresie după scufundări cu aer comprimat folosită de Royal Navy.

5.3.2.3. Teoria elvețiană

Bühlmann a luat în considerare, pentru calculul decompresiilor după scufundări cu aer comprimat, 16 compartimente de țesuturi caracterizate de diferite perioade de semisaturație. Datele sunt prezentate în tabelul 5.11.

Tabelul 5.11

Compartimentele de țesuturi și perioadele lor de semisaturație *H* luate în calcul la stabilirea procedeelor de decompresie după scufundări cu aer comprimat de către A. A. Bühlmann

Compartiment de țesuturi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Perioada de semisaturație *H* [min]	2,650	7,940	12,200	18,500	26,500	37	53	79	114	146	185	238	304	397	503	635
a	2,200	1,500	1,080	0,900	0,750	0,580	0,470	0,455	0,455	0,455	0,455	0,380	0,255	0,255	0,255	0,255
b	0,830	0,820	0,825	0,835	0,860	0,860	0,870	0,890	0,890	0,934	0,934	0,944	0,962	0,962	0,962	0,962

Pentru fiecare compartiment de țesuturi, presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator ambiant tolerată, $P_{a,tol}$, se calculează din presiunea gazului inert dizolvat în compartimentul de țesuturi, *p*, conform relației:

$$P_{a,tol} = (p - a)b, \tag{5-22}$$

unde valorile lui *a* și *b* sunt prezentate în tabelul 5.11.

În figura 5.16 este reprezentată curba de securitate a tabelelor de decompresie după scufundări cu aer comprimat elaborate de Laboratorul Hiperbar din Zürich, ZH-L_{12}.

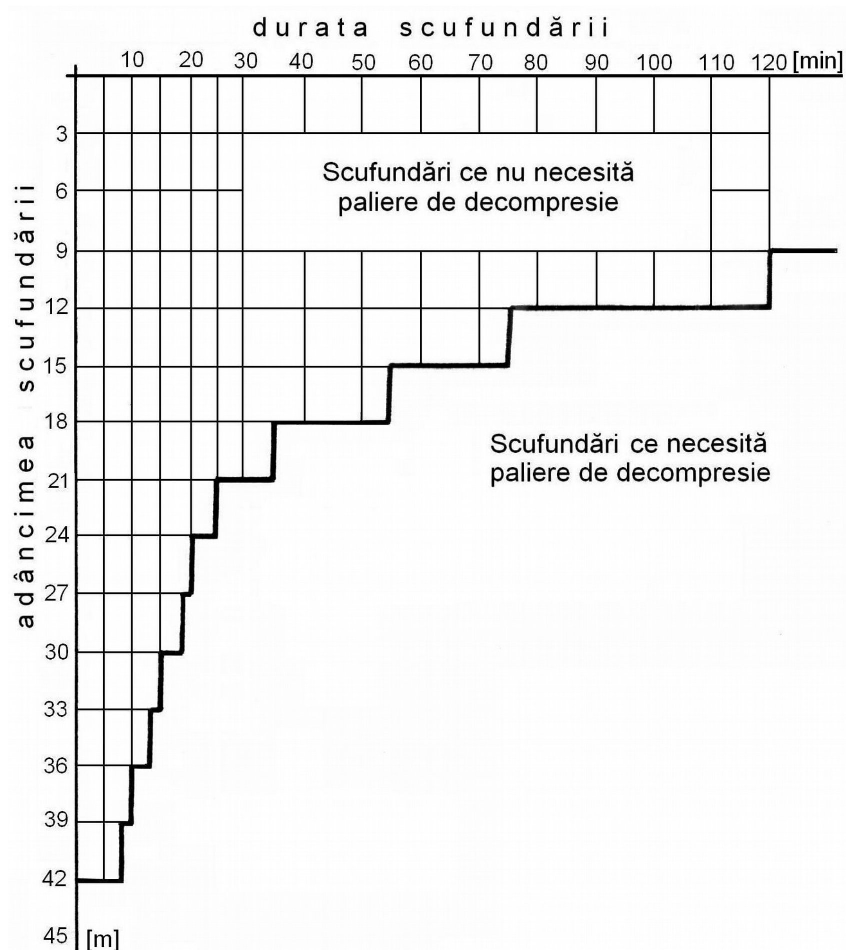


Fig. 5.16. Curba de securitate a tabelei de decompresie ZH – L_{12} după scufundări cu aer.

5.3.2.4. Teoria franceză

Pentru calculul tabelelor de decompresie după scufundări cu aer comprimat, folosite în Marina Națională a Franței, s-a utilizat metoda lui Haldane pentru compartimente de țesuturi ce au corespuns curbelor exponențiale determinate de Jones: H =1,5; 7,9; 29; 120 şi 300 minute. Țesuturile extreme au fost eliminate din calcul, dar a fost introdus şi compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație $H = 60$ minute.

S-a plecat de la ecuația (5-12) în care constanta caracteristică compartimentelor de țesuturi λ a avut valorile prezentate în tabelul 5.12.

Tabelul 5.12

Valorile constantelor caracteristice compartimentelor de țesuturi λ luate în calculul tabelelor de decompresie ale Marinei Naționale a Franței

Perioada de semisaturație a compartimentelor de țesuturi H [min]	λ
7	0,1
30	0,0231
60	0,01153
120	0,00577

Coeficienții de suprasaturație critici C_{SC} folosiți sunt prezentați în tabelul 5.13.

Tabelul 5.13

Coeficienţii de suprasaturaţie critici pentru diferite compartimente de ţesuturi caracterizate de diferite perioade de semisaturaţie *H*

Perioadele de semisaturaţie *H* [min]	7	30	60	120
Coeficienţii de suprasaturaţie critici C_{SC} [–]	2,56	1,84	1,6	1,6

Curba de securitate a tabelei de decompresie după scufundări cu aer comprimat a Marinei Naţionale franceze este reprezentată în figura 5.17. În afara acestor tabele, în Franţa se mai folosesc tabele ale Ministerului Muncii precum şi tabele de decompresie pentru scufundări sportive. Deosebirile dintre acestea constau în creşterea gradului de securitate pentru ultimele două. Spre exemplificare, în figura 5.18, se prezintă o comparaţie între curbele de securitate ale tabelelor de decompresie după scufundări cu aer comprimat elaborate de specialiştii francezi.

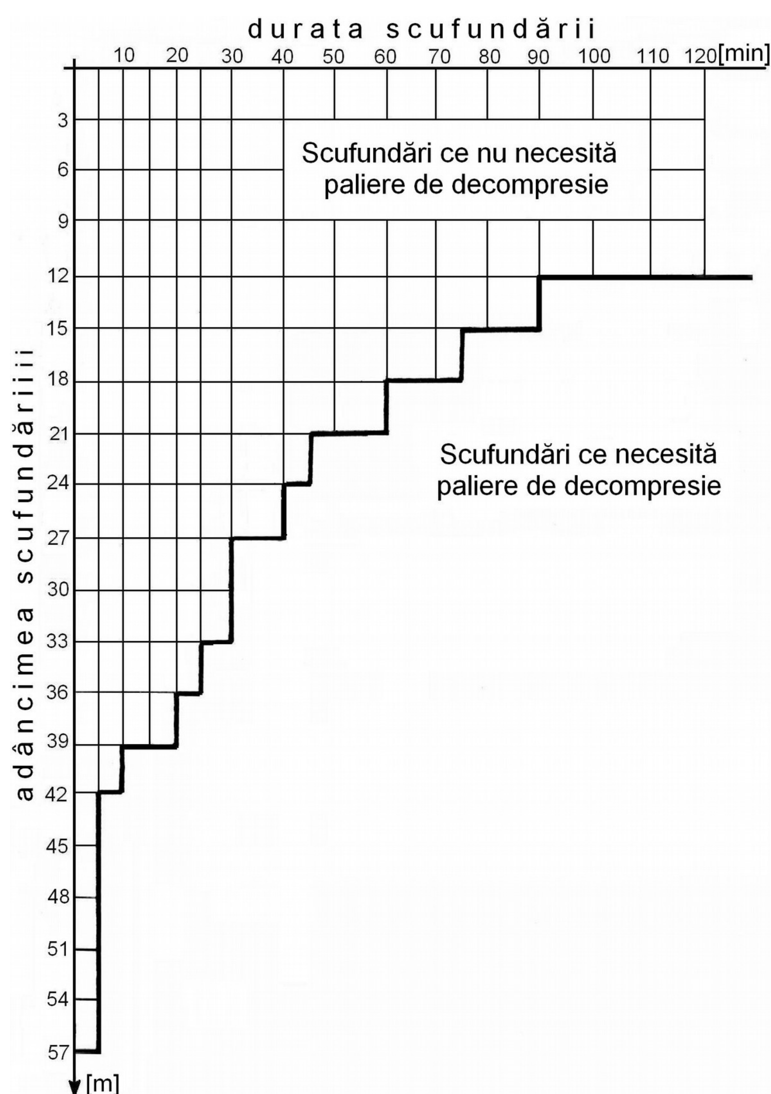


Fig. 5.17. Curba de securitate a tabelei de scufundare cu aer, GERS–65, a Marinei Naţionale franceze.

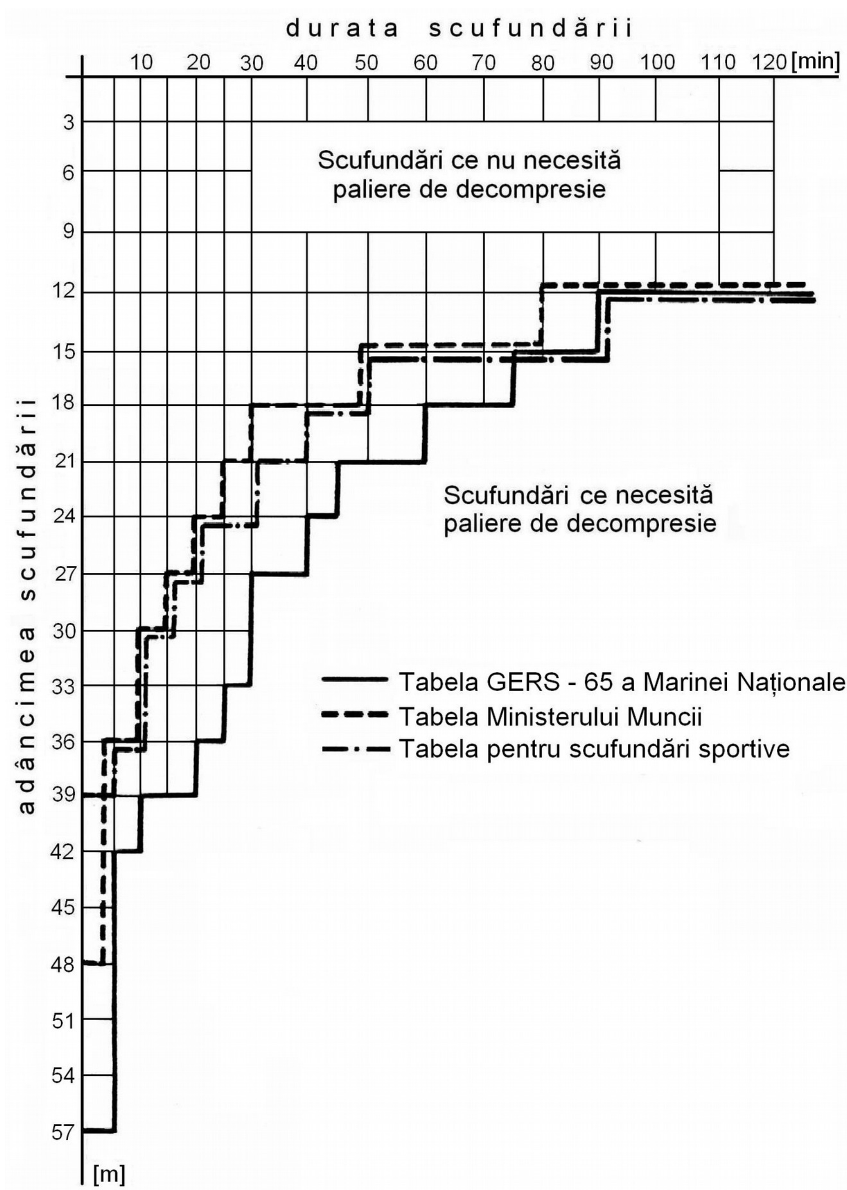


Fig. 5.18. Comparație între curbele de securitate ale tabelelor de scufundare franceze, calculate pentru diferite activități subacvatice.

5.3.2.5. Teoria românească

Pentru calculul procedeelor de decompresie după scufundări cu aer comprimat, specialiştii Laboratorului Hiperbar din Constanța au plecat de la experiența acumulată, în care literatura de specialitate este destul de bogată. Modelul matematic ales pentru calcule a luat în considerare compartimentele de țesuturi caracterizate de perioada de semisaturație *H* egală cu 10, 20, 40, 60, 80 şi 120 minute. În legătură cu conceptul coeficientului de suprasaturație critic, pentru calculul tabelelor de decompresie după scufundări unitare se recomandă utilizarea conceptului de diferență de presiune, iar conceptul coeficientului de suprasaturație critic este mai uşor de utilizat pentru calculul tabelelor de decompresie după scufundări în saturație.

Diferențele dintre presiunea gazului inert dizolvat în compartimentele de țesuturi şi presiunea parțială a aceluiaşi gaz din amestecul respirator, care definesc presiunile maxime admisibile ale gazului dizolvat funcție de adâncime, luate în calcul, sunt prezentate în tabelul 5.14.

Tabelul 5.14

Presiunea maximă admisibilă p_{adm} a azotului în compartimentele de țesuturi luate în calcul pentru elaborarea tabelelor de decompresie după scufundări cu aer comprimat

Adâncimea [m]	Perioada de semisaturație *H* [min]					
	10	20	40	60	80	120
	Presiunea totală maximă admisibilă p_{adm} [dm H_2O (sc.abs.)*]					
3	265	216	172	167	162	156
6	314	261	213	206	199	192
9	363	306	254	245	236	228
12	412	351	295	284	273	264
15	461	396	336	328	310	300
18	510	441	377	362	347	336
21	559	486	418	401	384	372

*) 1 dm H_2O =10^{-2} bar (ex.: 372 dm H_2O = 3,72 bar).

Pe tot timpul decompresiei, presiunea gazului inert dizolvat în țesuturile organismului trebuie să fie mai mică sau cel mult egală cu presiunea maximă admisibilă pentru compartimentul de țesuturi respectiv ($p_{ht} \leq p_{adm}$).

Decompresia (revenirea la presiunea atmosferică) se poate realiza în trepte (cu paliere de decompresie) sau în mod continuu. În general, pentru scufundări unitare autonome sau de sistem până la adâncimea de 120 m, decompresia se realizează în trepte, în timp ce pentru scufundări unitare de sistem la adâncimi de peste 120 m şi pentru scufundări în saturație, decompresia se realizează în mod continuu. Totuşi, aceasta nu este o regulă generală pentru că sunt unele şcoli de scufundare (şcoala britanică) care conduc decompresii în trepte după scufundări în saturație (întrerup decompresia pe timpul nopții). Această creştere a precauțiilor pentru reducerea eventualelor accidente de decompresie, din experiența autorilor, nu se justifică.

5.3.3. DECOMPRESIA ÎN TREPTE

Decompresia în trepte este caracteristică pentru scufundările unitare autonome şi de sistem până la adâncimea de 120 m şi se realizează în două etape:

– ridicarea la primul palier de decompresie;

– efectuarea palierelor de decompresie propriu-zise.

5.3.3.1. Calculul tabelelor de decompresie

Ridicarea la primul palier de decompresie se realizează cu viteza de 15...17 m/min. Din acest punct de vedere, şcolile de cercetări hiperbare au păreri unanime. Majoritatea tabelelor de decompresie sunt calculate pentru viteza de ridicare la primul palier de 15 m/min. Aceeaşi viteză a fost adoptată şi de specialiştii Laboratorului Hiperbar din Constanța la calculul tabelelor de decompresie după scufundări unitare.

Pe timpul ridicării la primul palier de decompresie şi chiar pe timpul primelor paliere, compartimentele de țesuturi ale organismului uman, care compun modelul

matematic de calcul, se comportă diferit. Compartimentele de țesuturi rapide se desaturează de gazul inert dizolvat, în timp ce compartimentele de țesuturi lente continuă să se satureze cu gaz inert.

a. Determinarea primului palier de decompresie

Pentru determinarea primului palier de decompresie trebuie să se revină la noțiunea definită anterior, presiunea maximă admisibilă a gazului inert dizolvat în țesuturi, p_{adm}. Valoarea acestei presiuni, stabilită inițial pe cale experimentală, a fost, după cum s-a arătat, îmbunătățită de mulți autori, fără a se îndepărta prea mult de datele inițiale şi a fost testată, prin tabelele de decompresie rezultate, pe subiecți cu particularități individuale specifice zonelor de lucru. Variația valorilor presiunii maxime admisibile a gazului inert dizolvat în țesuturile organismului uman folosite pentru calculul tabelelor de decompresie LH–82, elaborate de Laboratorul Hiperbar din Constanța sunt prezentate în figura 5.19.

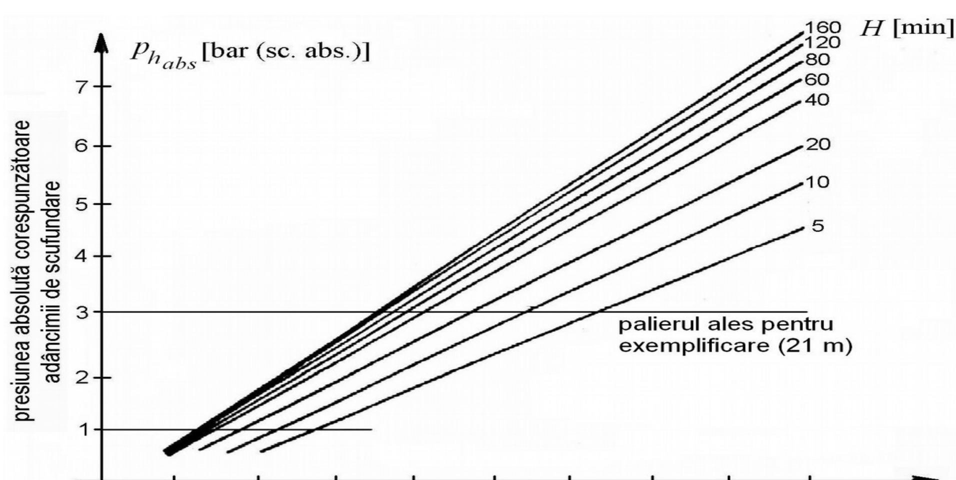


Fig. 5.19. Variația valorilor presiunii maxime admisibile a gazului inert (azotului) dizolvat în compartimentele de țesuturi ale organismului uman folosite pentru calculul decompresiilor după scufundări unitare în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța.

În figura 5.20 este reprezentată variația presiunii maxime admisibile a gazului inert (azotului) dizolvat în compartimentele de țesuturi folosite în calculul tabelelor de decompresie ZH – L_{12}, elaborate de Laboratorul de Fiziologie Hiperbară a Clinicii Universității din Zürich. Atât în figura 5.19 cât şi în figura 5.20, variația presiunilor maxime admisibile ale gazului inert dizolvat în țesuturi este funcție de modelul matematic utilizat.

Tabelele de decompresie LH – 82, elaborate şi testate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța, au fost calculate în anul 1982, iar A. A. Bühlmann şi-a publicat rezultatele cercetărilor pentru tabelele de decompresie ZH – L_{12} în 1984.

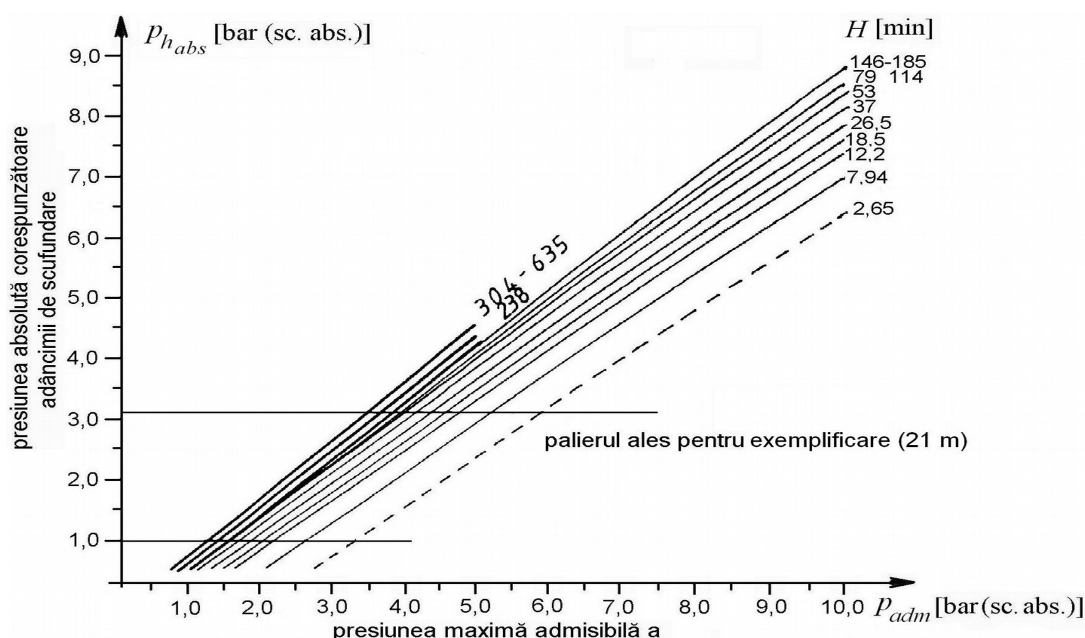


Fig. 5.20. Variația presiunii maxime admisibile a gazului inert (azotului) dizolvat în compartimentele de țesuturi ale organismului uman folosite în calculul tabelelor de decompresie ZH – L_{12}, elaborate de Laboratorul de Fiziologie Hiperbară din Zürich.

Nu este lipsită de interes o comparație între cele două reprezentări (fig. 5.19 și fig. 5.20). Spre exemplificare, se alege palierul de la adâncimea de 21 m [3,1 bar (sc. abs.)] și se compară valorile presiunilor maxime admisibile p_{adm} din compartimentele de țesuturi luate în calcul. Datele sunt prezentate în tabelul 5.15 și reprezentate grafic în figura 5.21.

Tabelul 5.15

Comparație între valorile presiunilor maxime admisibile ale gazului inert (azotului) dizolvat în compartimentele de țesuturi luate în calcul de Laboratorul Hiperbar din Constanța pentru tabelele de decompresie LH – 82 și de Bühlmann pentru tabelele de decompresie ZH – L_{12}

Tabelele	Date comparative (palierul de la 21 m)							
LH-82	*H*	5	10	20	40	80	120	160
	p_{adm}	6,46	5,59	4,86	4,18	3,81	3,72	3,57
ZH-L_{12}	*H*	3-8	12,2	18,5	37	79	114	146...185
	p_{adm}	5,8...5,15	4,7	4,5	4,1	3,85	3,85	3,80

S-a realizat comparația rezultatelor cercetărilor efectuate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța cu rezultatele cercetărilor efectuate de colectivul de specialiști condus de A.A. Bühlmann în cadrul Laboratorului Hiperbar din Zürich, deoarece acestea din urmă sunt recunoscute pe plan mondial datorită experienței acumulate în utilizarea amestecurilor respiratorii NITROX pentru scufundare în lacurile elvețiene, atât cu plecare de la nivelul presiunii atmosferice cât și de la altitudine.

Analizând graficele din figurile 5.19, 5.20 și 5.21 se remarcă o oarecare diferență între modelele matematice utilizate cât și între presiunile maxime admisibile ale gazului inert (azotului) dizolvat în țesuturile organismului uman. Pentru compartimentele de țesuturi cu perioada de semisaturație de până la 80 minute, pentru țesuturile rapide și

medii, modelul matematic folosit la elaborarea tabelelor LH – 82 acceptă presiuni admisibile mai mari. Situaţia se inversează pentru ţesuturile lente, cu perioade de semisaturaţie mai mari de 80 minute. Totuşi, diferenţele nu sunt semnificative.

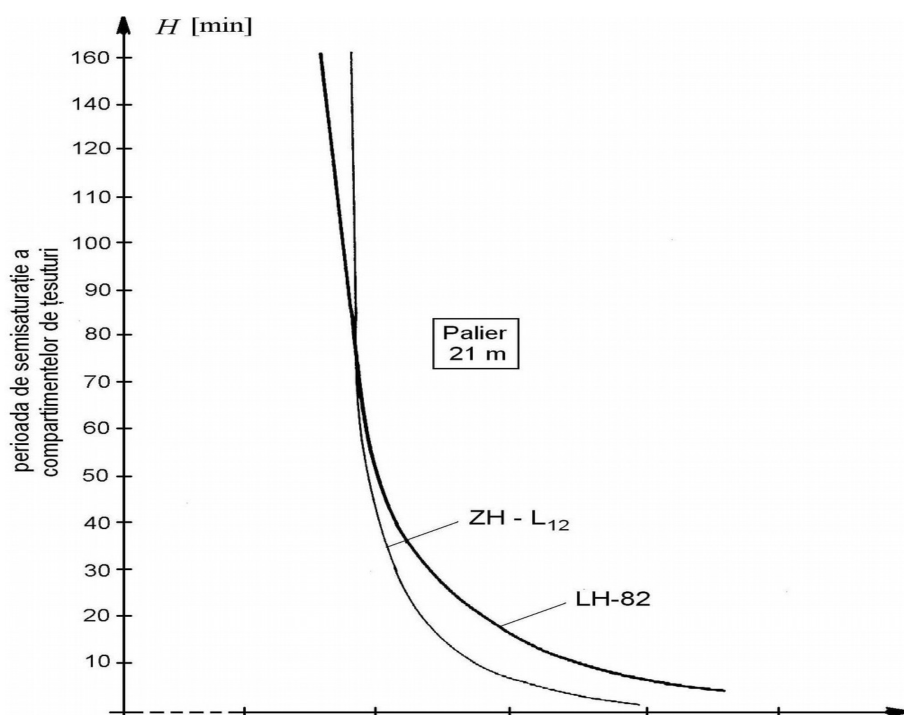


Fig. 5.21. Comparaţie între variaţia presiunilor maxime admisibile pentru diferite compartimente de ţesuturi ale organismului uman, caracterizate prin perioada lor de semisaturaţie cu gaz inert, în decompresii după scufundări cu aer comprimat, funcţie de presiunea ambiantă, după A.A. Bühlmann (ZH-L_{12}) şi după specialiştii Laboratorului Hiperbar din Constanţa (LH-82).

Pentru calculul decompresiei după scufundări unitare autonome cu amestecuri respiratorii NITROX, s-au generalizat treptele de decompresie din 3 în 3 m, ceea ce corespunde unei diferenţe de presiune nepericuloase pentru ţesuturile organismului uman. Primul palier de decompresie se stabileşte acolo unde, pentru prima dată, presiunea p_{ht} depăşeşte valoarea presiunii admisibile p_{adm}. Se prezintă un exemplu de calcul în tabelul 5.16. Valorile presiunii maxime admisibile se iau din tabelul 5.14.

Tabelul 5.16

Calculul elementelor expunerii țesuturilor organismului uman la presiunea corespunzătoare adâncimii de 30 m şi ridicării la primul palier de decompresie

Viteza de ridicare până la primul palier		15 m/min	Sosire la primul palier
			6 m
r_{gi} = 0,80	h [m]	30	
	p_h [bar (sc.abs.)]	4	2,8
	p_{hgi} [bar (sc.abs.)]	3,2	2,24
	t [min]	60	1,6
H = 10 min	u [-]	6	0,16
	F [-]	0,985	0,105
	Δp_{gi} [bar]	2,4	-0,924
	p_{gi} [bar (sc.abs.)]	0,8	3,164
	p_t [bar (sc.abs.)]	2,364	-0,097
	p_{ht} [bar (sc.abs.)]	3,164	3,067
	p_{adm} [bar (sc.abs.)]	pentru 3 m	3,14
H = 20 min	u	3	0,08
	F	0,874	0,054
	Δp_{gi}	2,4	-0,657
	p_{gi}	0,8	2,897
	p_t	2,097	-0,035
	p_{ht}	2,897	2,862
	p_{adm}	pentru 6 m	2,61
H = 40 min	u	1,5	0,04
	F	0,646	0,027
	Δp_{gi}	2,4	-0,110
	p_{gi}	0,8	2,350
	p_t	1,550	-0,003
	p_{ht}	2,350	2,347
	p_{adm}	pentru 6 m	2,13
H = 80 min	u	0,75	0,02
	F	0,405	0,013
	Δp_{gi}	2,4	0,468
	p_{gi}	0,8	1,772
	p_t	0,972	0,006
	p_{ht}	1,772	1,778
	p_{adm}	pentru 3 m	1,62

Se constată că, pentru compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație H =10 minute este necesară oprirea decompresiei la palierul de 3 m adâncime, unde $p_{ht} = p_{3\,\mathrm{m}} = 3{,}164$ bar (sc. abs.) este mai mare decât $p_{adm} = 3{,}14$ bar (sc. abs.); pentru

compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație H =20 minute este necesară oprirea decompresiei la palierul de 6 m adâncime, unde $p_{ht} = p_{6\text{m}} = 2,897$ bar (sc. abs.) este mai mare decât $p_{adm} = 2{,}61$ bar (sc. abs.); pentru compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație H = 40 minute este necesară oprirea decompresiei la palierul de 6 m adâncime, unde $p_{ht} = p_{6\text{m}} = 2,35$ bar (sc. abs.) este mai mare decât $p_{adm} = 2{,}13$ bar (sc. abs.) și, în sfârșit, pentru compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație H = 80 minute este necesară oprirea decompresiei la palierul de 3 m adâncime, unde $p_{ht} = p_{3\text{m}} = 1,772$ bar (sc. abs.) este mai mare decât $p_{adm} = 1{,}62$ bar (sc. abs.).

Din analiza datelor prezentate mai sus se va alege ca prim palier de decompresie palierul cel mai profund, adică palierul de la 6 m adâncime, care este acoperitor pentru toate celelalte adâncimi de palier.

b. Determinarea caracteristicilor compartimentelor de țesuturi la sosirea la primul palier

O dată stabilit primul palier de decompresie, înainte de a se trece la calculul timpului de staționare la fiecare palier, până la revenirea la presiunea atmosferică, trebuie determinate caracteristicile compartimentelor de țesuturi în momentul sosirii la acest palier. Caracteristicile acestora sunt prezentate în tabelul 5.16 (coloana a 4-a).

Pentru calcule s-a plecat de la următoarele date:

– viteza de ridicare la primul palier care este de 15 m/min;

– presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator care este definită ca o medie între presiunea parțială de la adâncimea maximă a scufundării şi de la adâncimea corespunzătoare primului palier; în exemplul de față:

$$p_{hgi} = \frac{p_{30gi} + p_{6gi}}{2} = \frac{3,2 + 1,28}{2} = 2,24 \text{ bar (sc. abs.)};$$

– timpul de expunere al organismului uman la această presiune care este timpul în care se ajunge la primul palier de decompresie; în cazul de față:

$$t = \frac{30 - 6}{15} = 1,6 \text{ min};$$

– presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator p_{gi} care, la decompresie, devine egală cu presiunea aceluiaşi gaz dizolvat în țesuturile organismului de la palierul de presiune imediat superior.

Analizând rezultatele prezentate în tabelul 5.16, se constată că pe timpul ridicării spre primul palier nu toate țesuturile încep să se desatureze. Compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație H = 80 minute continuă să dizolve gaz inert ($\Delta p_{gi} > 0$), în timp ce compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație H = 10 minute se desaturează suficient pentru a permite revenirea până la presiunea atmosferică.

c. Calculul palierelor de decompresie

Pentru calculul palierelor de decompresie trebuie determinate următoarele elemente:

– fracțiunea de gaz inert F ce trebuie eliminată din țesuturile organismului la palierul de decompresie:

$$F = \frac{p_{adm} - p_{ht}}{\Delta p_{gi}} = \frac{p_{adm} - p_{ht}}{p_{hgi} - p_{gi}}, \qquad (5\text{-}23)$$

unde p_{adm} este presiunea maximă admisibilă a gazului inert dizolvat în țesuturi la palierul respectiv [bar (sc. abs.)];

p_{ht} – presiunea totală a gazului inert dizolvat într-un compartiment de țesuturi la presiunea absolută corespunzătoare adâncimii de scufundare, după timpul t de expunere, sau corespunzătoare palierului imediat superior [bar (sc. abs.)];

Δp_{gi} – diferența de presiune dintre presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator de la presiunea corespunzătoare palierului de decompresie p_{hgi} şi presiunea aceluiaşi gaz dizolvat în țesuturile organismului p_{gi} $(\Delta p_{gi} = p_{hgi} - p_{gi})$ [bar].

Cu ajutorul relației:

$$F = 1 - 0,5^{u} = 1 - 0,5^{t/H}, \qquad (5\text{-}24)$$

unde t este timpul necesar de staționare la palierul de decompresie pentru eliminarea fracțiunii de gaz inert F dizolvat în compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație H. Logaritmând relația (5-24) se obține expresia timpului de staționare la palierul respectiv de decompresie:

$$t = -1,44H \ln(1 - F), \qquad (5\text{-}25)$$

unde F este calculat cu relația (5-23).

Din acest moment, noua presiune parțială a gazului inert din compartimentele de țesuturi ale modelului matematic, va fi egală cu presiunea admisibilă pentru noul palier, dar numai în cazul în care acest compartiment dirijează decompresia, compartiment de țesuturi care necesită timpul cel mai mare de staționare la palierul respectiv. În general, procedeul de decompresie este dirijat de un singur compartiment de țesuturi despre care se spune că este *compartimentul de țesuturi director al decompresiei.*

Spre exemplificare, în tabelul 5.17 este prezentat calculul pentru compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație H = 40 minute, care poate fi considerat ca țesutul director al acestei scufundări, după executarea unei scufundări la adâncimea de 30 m, cu timpul de expunere la presiune de 60 minute. Din calcule rezultă că, pentru a se reveni la presiunea atmosferică după o scufundare la adâncimi de 30 m timp de 60 minute, sunt necesare două paliere de decompresie, unul de 14 minute la 6 m şi altul de 27 minute la 3 m.

Tabelul 5.17

Calculul decompresiei pentru compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație H = 40 minute după o scufundare la adâncimea de 30 m cu timp de expunere la presiune de 60 minute

Viteza de ridicare la primul palier 15 m/min			Sosire la palierul	Paliere			
				I	I	II	III
			6 m	6 m	6 m	3 m	3 m
r_{gi} = 0,80	h [m]	30					
	p_h [bar (sc. abs.)]	4	2,8	1,6	1,6	1,3	1,3
	p_{hgi} [bar (sc. abs.)]	3,2	2,24	1,28	1,28	1,04	1,04
	t [min]	60	1,6		14		27
H = 40 min	u [-]	1,5	0,04		0,35		0,675
	F [-]	0,646	0,027	0,203	0,215	0,369	0,373
	Δp_{gi} [bar]	2,4	-0,110	-1,067	-1,067	-1,078	-1,078
	p_{gi} [bar (sc. abs.)]	0,8	2,350	2,347	2,347	2,118	2,118
	p_t [bar (sc. abs.)]	1,550	-0,003		-0,229		-0,402
	p_{ht} [bar (sc. abs.)]	2,350	2,347		2,118		1,716
	p_{adm} [bar (sc. abs.)]	2,130	2,130	2,130	2,130	1,720	1,720
Durata palierelor de decompresie				t = 14 min		t = 27 min	

Analizând tabelul 5.17 se observă faptul că procedeul de decompresie nu desaturează complet compartimentul de țesuturi, deci la revenirea la presiunea atmosferică acesta continuă să se desatureze. În exemplul dat, compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație $H = 40$ minute revine la presiunea atmosferică cu o presiune a gazului inert dizolvat de 1,72 bar (sc. abs.). Observația este foarte importantă pentru activitatea ulterioară a scafandrului, din mai multe puncte de vedere:

– pot să apară accidente de decompresie chiar şi după o revenire normală la presiunea atmosferică;

– nu se poate executa o nouă scufundare după tabela de decompresie calculată anterior decât după un anumit interval de timp petrecut la presiunea atmosferică;

– nu se poate părăsi zona şantierului subacvatic cu avionul sau alt mijloc de zbor decât după un anumit interval de timp.

d. Timpul după care nu mai există pericol de accidente de decompresie

Pentru scufundări unitare cu aer comprimat până la adâncimea de 60 m, compartimentul de țesuturi director al decompresiei este cel cu perioada de semisaturație $H = 40$ minute. Se cunoaşte că un compartiment de țesuturi este saturat cu gaz inert când raportul $t/H = 6$. Cum desaturarea se produce după aceeaşi curbă exponențială, se poate aprecia că compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație $H = 40$ minute se desaturează după 40 × 6 = 240 minute, adică după 4 ore. În concluzie, pentru securitatea scafandrilor, după revenirea la presiunea atmosferică, aceştia trebuie să rămână în apropierea unei barocamere de recompresie terapeutică încă aproximativ 4

ore. Tratamentul accidentelor de decompresie se face numai prin recomprimare şi oxigenoterapie hiperbară.

Pentru scufundări unitare cu amestecuri HELIOX până la adâncimea de 120 m, intervalul de 4 ore de staționare în apropierea unei barocamere de recompresie poate fi considerat, de asemenea, acoperitor pentru prevenirea accidentelor de decompresie după revenirea la presiunea atmosferică.

e. Timpul după care se poate executa o nouă scufundare cu caracteristicile primei scufundări

Scufundările unitare cu aer comprimat până la adâncimea de 60 m sunt considerate scufundări cu expuneri de scurtă durată, care corespund saturării compartimentelor de țesuturi cu perioade de semisaturație $H = 80$ minute. În această situație, compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație $H = 80$ minute se consideră desaturat după $80 \times 6 = 480$ minute, adică după 8 ore. În concluzie, pentru securitatea scafandrilor, aceştia nu pot executa o nouă scufundare cu caracteristicele celei precedente decât după 8 ore de staționare la presiunea atmosferică. Orice scufundare executată la un interval mai mic de 8 ore este considerată *scufundare succesivă*, iar revenirea la presiunea atmosferică se face după o altă tabelă de decompresie, în calculul căreia se ține cont de gazul inert remanent în țesuturile organismului uman la începutul scufundării succesive.

Scufundările unitare cu amestecuri HELIOX până la adâncimea de 120 m sau mai mult, sunt considerate scufundări cu expuneri de durată medie, care corespund saturării compartimentelor de țesuturi cu perioada de semisaturație $H = 120$ minute, sau chiar mai mult. În aceste condiții, nu se poate executa o nouă scufundare decât după minimum $120 \times 6 = 720$ minute, adică după 12 ore de staționare la presiunea atmosferică. Deoarece, în timpul expunerii la presiunea ambiantă ridicată, pot interveni şi compartimente de țesuturi cu perioade de semisaturație mai mari $H = 120$ minute, se poate considera ca interval de securitate, între două scufundări unitare profunde cu amestecuri respiratorii HELIOX, intervalul de 24 ore.

f. Timpul după care scafandrul revenit la presiunea atmosferică dintr-o scufundare, poate părăsi zona şantierului subacvatic cu avionul sau alt mijloc de zbor

Ridicarea la altitudini de peste 2500...3000 m, după o scufundare, poate provoca accidente de decompresie.

Timpul de staționare la presiunea atmosferică înaintea efectuării unui zbor cu avionul se calculează funcție de caracteristicile scufundării efectuate (adâncime, amestec respirator utilizat şi timp de expunere a organismului la presiune), de presiunea remanentă a gazului inert din compartimentul de țesuturi director al decompresiei şi de amestecul respirator folosit pe timpul staționării la presiunea atmosferică înaintea efectuării zborului (respirarea amestecurilor supraoxigenate sau a oxigenului pur reduce timpul de staționare necesar înaintea efectuării zborului). Acest aspect este important de cunoscut pentru că riscul de apariție a accidentelor este proporțional cu altitudinea zborului.

5.3.3.2. Tabele de decompresie după scufundări cu aer comprimat

Tabelele de decompresie actuale, calculate de diferite şcoli de scufundare, nu sunt identice. În continuare, se propune o primă analiză asupra curbelor de securitate, curbe ce delimitează zona până la care scufundările nu necesită paliere de decompresie. Această comparație este prezentată în figura 5.22, din care se pot constata diferențele

dintre tabele. La aceeaşi adâncime de scufundare apar diferențe mari, de peste 50 minute la 18 m, ca apoi acestea să scadă la 25 minute la 21 m şi să dispară la adâncimi de peste 42 m. Aceste diferențe se pun pe seama modelului matematic utilizat la calculul decompresiei.

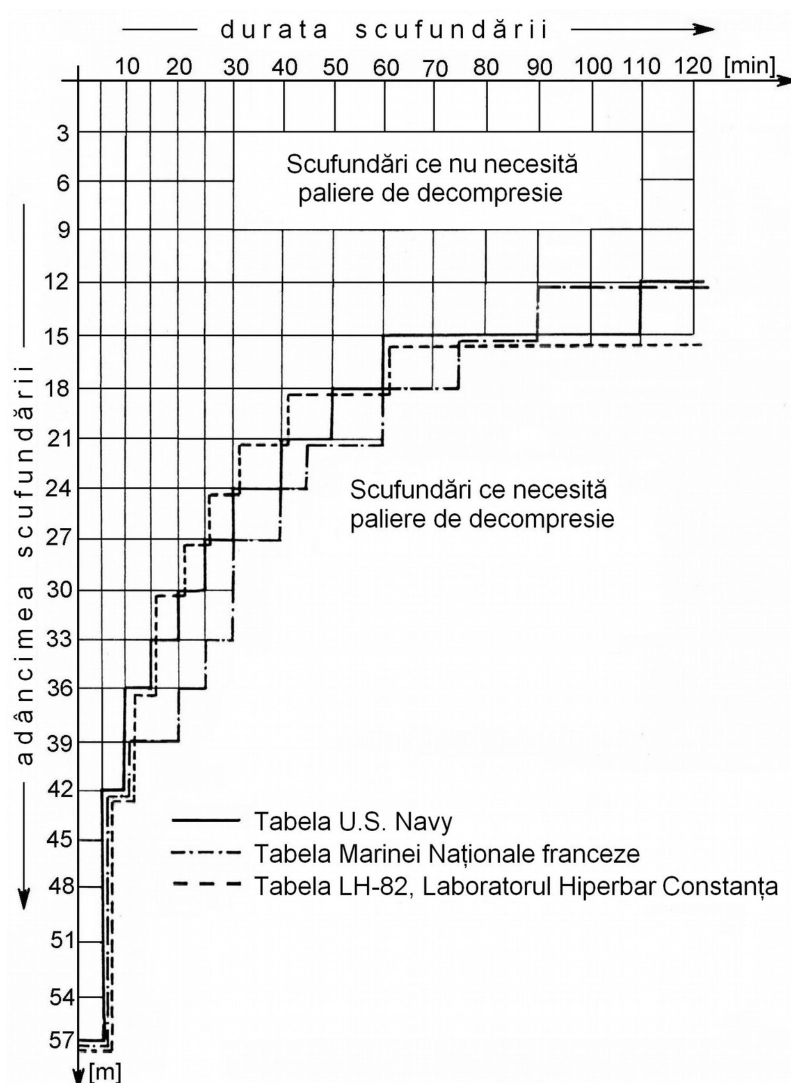


Fig. 5.22. Comparație între curbele de securitate ale diferitelor tabele de decompresie.

În figura 5.23 este reprezentată comparația între tabelele de decompresie după scufundări cu aer la adâncimea de 30 m cu timp de expunere de 120 minute. Cele patru tabele comparate folosesc acelaşi interval de 3 m între paliere. Tabela engleză are primul palier la adâncimea de 15 m şi cele mai lungi staționări la palierele de 9 m şi 6 m. Primul palier pentru tabelele U.S. Navy, ZH–L_{12} şi LH–82, este la adâncimea de 9 m. Cel mai lung palier la adâncimea de 3 m îl are tabela U.S. Navy, iar cel mai scurt tabela Royal Navy. Cea mai rapidă tabelă este tabela LH–82.

Palierele de decompresie de la adâncimi mari se traduc, făcând apel la modelul matematic al procedeului decompresiei, la admiterea unei presiuni a gazului inert dizolvat în țesuturi mai mică decât cea admisibilă. Din experiența acumulată s-a constatat că se pot face paliere de decompresie la adâncimi mai mici, deci se poate

admite o presiune admisibilă a gazului inert dizolvat în țesuturi mai mare, ceea ce are drept consecință reducerea duratei totale a decompresiei.

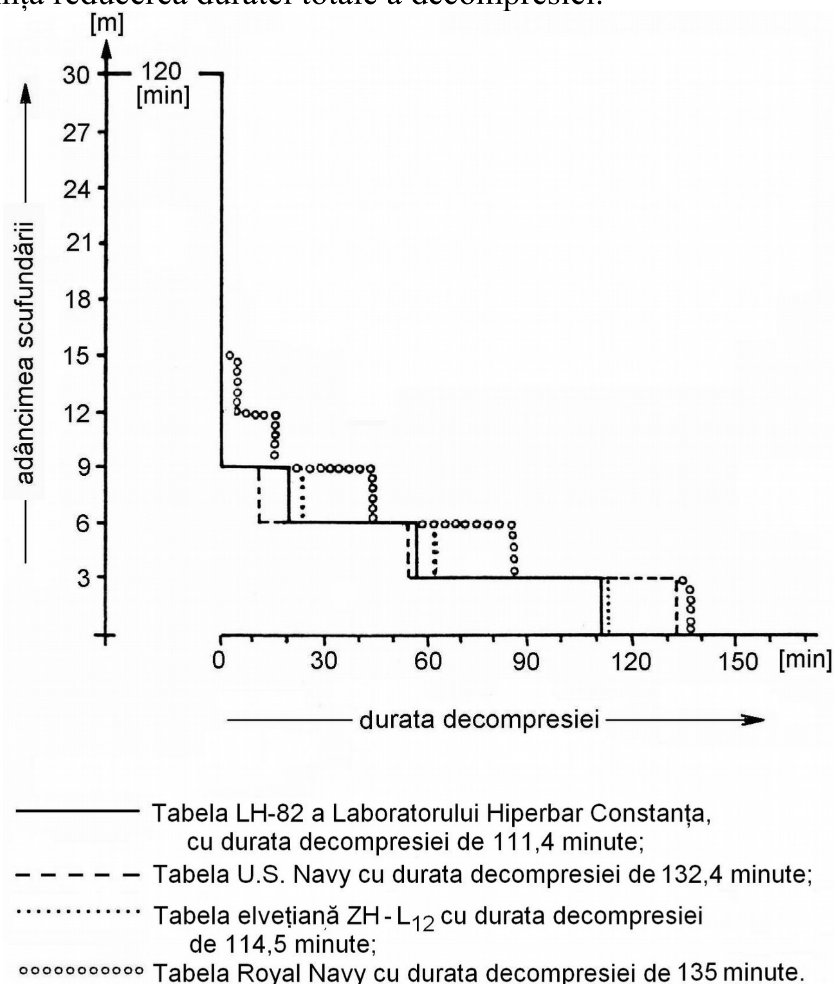


Fig. 5.23. Comparație între diferite tabele de decompresie după o scufundare unitară cu aer de 120 minute la adâncimea de 30 m.

În cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța, în perioada aprilie 1981 – – aprilie 1992, s-au efectuat scufundări experimentale care au însumat 3053 scufundări la adâncimi de până la 72 m, pentru diferiți timpi de expunere a organismului uman la presiunea corespunzătoare adâncimii scufundării. Pentru adâncimea de 72 m s-a utilizat tabela Marinei Naționale franceze, la care incidența accidentelor de decompresie a fost de 3%. Pentru celelalte adâncimi au fost utilizate tabelele LH–82, U.S. Navy şi Decret 74 – Franța.

Testele au pus în evidență faptul că accidentele de decompresie apar peste adâncimea limită de 40 m. Astfel, până la adâncimea de 40 m s-au executat 1880 de scufundări cu o incidență a accidentelor de decompresie de 0,05%, ceea ce recomandă această adâncime limită pentru scafandrii neprofesioniști. Incidența accidentelor de decompresie s-a înscris în riscul acceptat pe plan internațional (sub 3...5%). Dacă se iau în considerare toate scufundările efectuate, incidența accidentelor a fost de 0,7%, iar dacă se iau în considerare numai scufundările efectuate în afara curbei de securitate (scufundări ce au necesitat paliere de decompresie pentru revenirea la presiunea atmosferică) incidența accidentelor de decompresie a fost de 1,2%. Trebuie remarcat

faptul că scufundările executate sub curba de securitate (scufundări ce nu necesită executarea de paliere la decompresie pe timpul revenirii la presiunea atmosferică) nu au înregistrat accidente de decompresie (au fost executate 1581 de scufundări).

Pentru comparaţie, se exemplifică raportul redactat în anul 1980 de către Berghage şi Durman privind observaţiile asupra a 16170 scufundări executate după tabela U.S. Navy. Din 295 procedee de decompresie au fost folosite 43 de procedee de 100 de ori, iar jumătate dintre acestea nu au fost folosite deloc. Incidenţa accidentelor de decompresie a fost de 1,25%. Tabela de decompresie britanică, elaborată în 1968, a avut o incidenţă a accidentelor de decompresie de până la 20%. În anul 1975, Hempelmann calculează o nouă tabelă care a dus la micşorarea incidenţei accidentelor de decompresie.

5.3.3.3. Tabele de decompresie după scufundări succesive

Scufundarea succesivă, definită anterior, este scufundarea care se execută la un interval mai mic de 8 ore de scufundarea precedentă. Când se execută o scufundare succesivă, durata decompresiei, după cea de-a două scufundare, creşte datorită faptului că se ia în calcul şi presiunea gazului rezidual rămas la revenirea la presiunea atmosferică după prima scufundare. Tabelele de decompresie după scufundări succesive sunt derivate din tabelele de decompresie după scufundări cu aer comprimat.

Tabelele de decompresie ruseşti nu indică posibilitatea efectuării de scufundări succesive. Tabelele britanice menţionează un calcul al decompresiei pentru scufundarea succesivă prin însumarea timpilor celor două scufundări la adâncimea maximă de lucru. Tabela franceză Decret 74 indică pentru fiecare interval procedeul corespunzător de decompresie. Tabelele americane, tabelele Marinei Naţionale franceze şi tabelele româneşti LH–82 dau un coeficient pe baza căruia se determină procedeul de decompresie pentru scufundarea succesivă. Coeficientul este calculat funcţie de presiunea gazului inert remanent în compartimentul de ţesuturi cu perioada de semisaturaţie de 120 minute, la revenirea la presiunea atmosferică, după prima scufundare.

În figura 5.24 este prezentată o comparaţie între duratele unei decompresii după o scufundare succesivă executată la un interval de o oră de la scufundarea precedentă. Caracteristicile timp de lucru în imersiune şi timp de coborâre la adâncime sunt aceleaşi. Întâi s-a prezentat un profil real al scufundării, după care, pentru simplificarea redării, s-au unit punctele de plecare din imersiune cu punctele de revenire la presiunea atmosferică.

Se constată o creştere a duratei decompresiei cu peste 100% precum şi faptul că apar diferenţe între tabelele de decompresie comparate. Tabela britanică este mai "lungă" pentru că nu ţine cont de faptul că, pe timpul staţionării la presiunea atmosferică, gazul inert dizolvat în ţesuturi continuă să se elimine.

Cu cât staţionarea la presiunea atmosferică este mai mare, cu atât durata decompresiei după scufundarea succesivă este mai apropiată de durata iniţială. De acest aspect ţin cont tabelele americane, franceze şi româneşti LH–82. În plus, aceste tabele de decompresie permit scurtarea decompresiei după o scufundare succesivă prin respirarea oxigenului pur pe timpul intervalului de la suprafaţă. Respirarea oxigenului pur pe timpul staţionării la suprafaţă permite o degazare mai rapidă a ţesuturilor

organismului de gazul inert remanent, ceea ce facilitează efectuarea de scufundări succesive la intervale mici, cu timpi de decompresie apropiați de timpii de decompresie ai scufundării precedente.

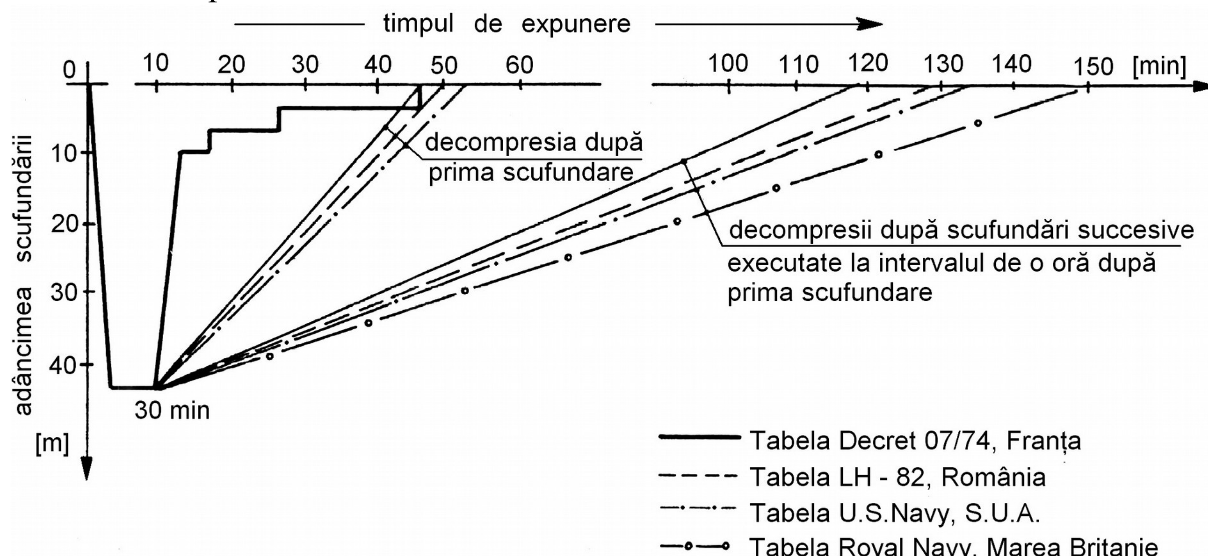


Fig. 5.24. Comparație între duratele decompresiilor după o scufundare succesivă executată la un interval de o oră de prima scufundare, la adâncimea de 42 m. Caracteristicile, timp de coborâre şi timp de lucru în imersiune sunt aceleaşi pentru ambele scufundări.

5.3.3.4. Tabele de decompresie după scufundări cu amestecuri NITROX supraoxigenate

Tabelele de decompresie după scufundări cu amestecuri NITROX supraoxigenate au apărut ca urmare a necesității creşterii duratei de lucru sub apă şi reducerii duratei decompresiei. Din literatura de specialitate se cunosc trei tipuri de amestecuri NITROX supraoxigenate, în care concentrația oxigenului este de 32,5%, 40% şi 60%. În cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța s-a efectuat calculul decompresiilor după scufundări cu amestecuri NITROX supraoxigenate, în care concentrația oxigenului a fost de 30%, 40%, 50% şi 60%. Trebuie menționat faptul că, majoritatea şcolilor de scufundare recomandă utilizarea tabelelor de decompresie după scufundări cu aer comprimat, la care se aplică o corecție de adâncime, calculându-se o adâncime echivalentă cu relația:

$$h_e = h \frac{p_{N_2,1}}{p_{N_2,0}}, \qquad (5\text{-}26)$$

unde h_e este adâncimea echivalentă [m];

h – adâncimea la care se execută scufundarea [m];

$p_{N_2,1}$ – presiunea parțială a azotului din amestecul respirator [bar (sc. abs.)];

$p_{N_2,0}$ – presiunea parțială a azotului din aer [bar (sc. abs.)].

Prin urmare, scufundarea se va executa la adâncimea h, iar decompresia se va efectua conform indicațiilor date de tabela de decompresie în dreptul adâncimii echivalente h_e, care este, în acest caz, mai mică $(h_e < h$, deoarece $p_{N_2,1} < p_{N_2,0})$.

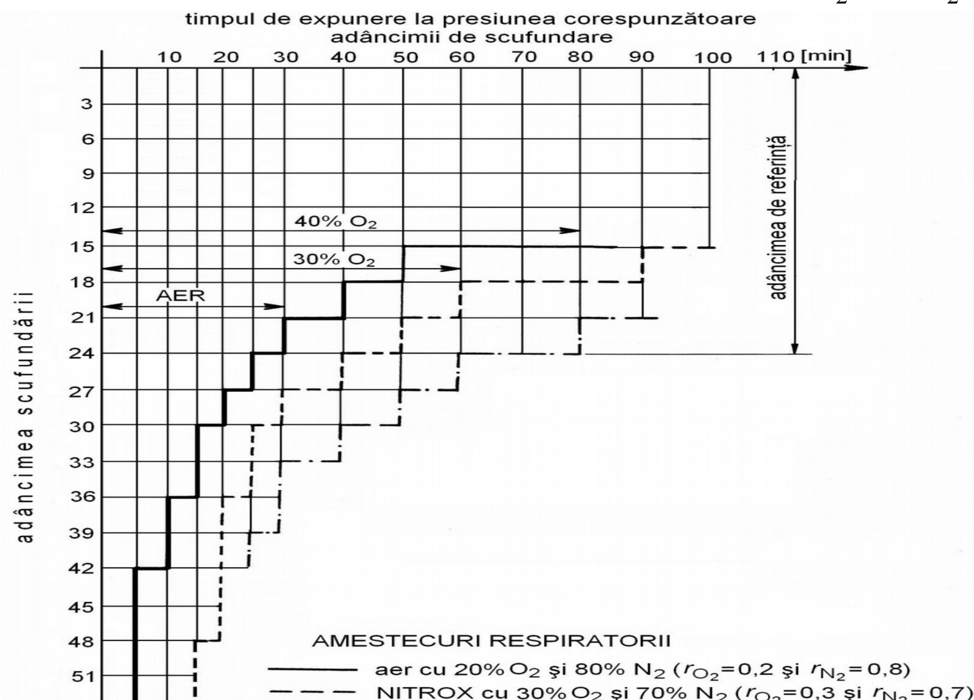


Fig. 5.25. Comparație între curbele de securitate ale tabelelor de decompresie după scufundări cu aer şi cu amestecuri NITROX supraoxigenate, calculate la Laboratorul Hiperbar din Constanța.

Cercetătorii Laboratorului Hiperbar din Constanța au renunțat la acest procedeu şi au calculat tabelele de decompresie după scufundări cu amestecuri NITROX supraoxigenate conform metodei utilizate la calculul tabelei de decompresie după scufundări cu aer comprimat. În figura 5.25 este prezentată a comparație între curbele de securitate ale tabelelor de decompresie după scufundări cu aer şi după scufundări cu amestecuri NITROX supraoxigenate, ambele elaborate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța. Se remarcă avantajul utilizării amestecurilor NITROX supraoxigenate comparativ cu utilizarea aerului. Astfel, pentru aer (20% oxigen, $r_{O_2} = 0{,}2$) se permit scufundări la adâncimea de 24 m, sub curba de securitate, timp de 30 minute, cu amestec NITROX cu 30% oxigen ($r_{O_2} = 0{,}3$), timp de 50 minute, iar cu amestec NITROX cu 40% oxigen ($r_{O_2} = 0{,}4$), timp de 80 minute. Deci, cu amestecuri NITROX supraoxigenate se poate ajunge la o considerabilă creştere a timpului de lucru în imersiune fără a fi necesară o revenire la presiunea atmosferică cu executarea de paliere la decompresie. Acest lucru conferă un randament sporit scufundărilor precum şi o mai mare siguranță oferită scafandrilor în cazul unor incidente ce necesită revenirea imediată la presiunea atmosferică. Totuşi, utilizarea acestor tabele necesită anumite precauții datorită toxicității oxigenului hiperbar. Scafandrii trebuie supuşi la teste suplimentare privind susceptibilitatea la oxigenul hiperbar, cu investigații

electroencefalografice. Acesta este motivul pentru care amestecurile NITROX supraoxigenate sunt utilizate numai de scafandrii profesionişti, civili şi militari.

S-a prezentat anterior faptul că majoritatea şcolilor de scufundare folosesc noţiunea de adâncime echivalentă h_e, pentru determinarea decompresiei după scufundări cu amestecuri NITROX supraoxigenate. Avantajul metodei utilizate de Laboratorul Hiperbar din Constanţa este exemplificat în tabelul 5.18, printr-un exemplu de revenire la presiunea atmosferică după o scufundare cu amestec NITROX supraoxigenat (40% oxigen şi 60% N_2 adică r_{O_2} = 0,4 şi r_{N_2} = 0,6), la adâncimea de 33 m, cu timp de expunere în imersie de 60 minute. Pentru comparare, au fost aplicate teoria adâncimii echivalente şi modelul matematic folosit de specialiştii din Laboratorul Hiperbar din Constanţa.

Conform teoriei adâncimii echivalente, pentru exemplul dat: $h_e = 33\,(0,6/0,8) = 24,75$ m, deci decompresia după scufundarea cu amestec NITROX supraoxigenat (cu 40% oxigen şi 60% azot) la adâncimea de 33 m, se va efectua după indicaţiile tabelei de decompresie după scufundări cu aer, corespunzătoare adâncimii de 27 m, multiplu de 3 m imediat superior adâncimii echivalente calculate de 24,75 m. Pentru o mai bună exemplificare, în tabelul 5.18 sunt prezentate şi caracteristicile decompresiei pentru o scufundare cu amestec respirator NITROX supraoxigenat (r_{O_2} = 0,4 şi r_{N_2} = 0,6), la o adâncime de 24 m, mai apropiată de adâncimea echivalentă, timp de 60 minute, pentru cele două metode de calcul.

Tabelul 5.18

Comparaţie între datele privind decompresia după scufundări cu amestecuri NITROX supraoxigenate (40% oxigen) la 33 m timp de 60 minute, funcţie de metoda de calcul folosită

Metoda de calcul	Adâncimea [m]	Timp de ridicare la primul palier [min]	Paliere [min]		Durata scufundării [min]
			9 m	3 m	
Teoria adâncimii echivalente	24	1,4	–	23	24,4
	27	1,4	6	28	35,4
Modelul matematic folosit de Laboratorul Hiperbar din Constanţa	33	2	–	9	11

Din tabelul de mai sus se observă superioritatea modelului matematic folosit de Laboratorul Hiperbar din Constanţa la calculul tabelelor de decompresie după scufundări cu ametecuri NITROX supraoxigenate, care este mult mai apropiat de realitatea necesarului de timp pentru revenirea la presiunea atmosferică. Metoda adâncimii echivalente nu poate da rezultate apropiate de cele reieşite din modelul matematic deoarece introduce două mari aproximaţii şi anume:

– formula în sine reprezintă o aproximaţie;

– adâncimea echivalentă trebuie rotunjită la o valoare multiplu de trei, imediat superioară, ceea ce introduce o aproximare destul de importantă.

Deoarece este vorba de un cumul însemnat de aproximații, apare ca normală diferența mare dintre indicațiile celor două metode.

Rezultatele modelului matematic folosit au fost validate, atât de experimentele şi testele efectuate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța, cât şi de activitățile reale de scufundare în zona câmpului petrolifer al Mării Negre, unde au fost utilizate până la adâncimea de 51 m.

S-au efectuat 285 scufundări la adâncimi cuprinse între 36 m şi 51 m, pentru timpi de expunere a organismului uman la presiunea corespunzătoare adâncimii de scufundare cuprinşi între 5 minute şi 50 minute, la care incidența accidentelor de decompresie a fost de 0,7%. Dacă se ține cont de faptul că numai 261 de scufundări au fost efectuate în afara curbei de securitate (scufundări care au necesitat paliere la decompresie), incidența accidentelor de decompresie a fost de 0,8%. Se poate aprecia faptul că tabelele elaborate la Laboratorul Hiperbar Constanța sunt sigure, oferind posibilitatea unei activități subacvatice prelungite şi unui timp de revenire la presiunea atmosferică mai mic. Rezultatele au fost confirmate de cele câteva mii de scufundări, fără accidente de decompresie, executate la lucrări în Marea Neagră pentru montarea şi întreținerea platformelor de foraj marin.

5.3.3.5. Tabele cu decompresia la suprafață

Anumite tipuri de lucrări subacvatice precum şi condițiile hidro-meteo nefavorabile, nu permit întotdeauna executarea în apă a palierelor pentru revenirea la presiunea atmosferică. Valurile mari, hula marină sau curenții de la suprafață, fac imposibilă staționarea la palierele de la 3 m sau chiar 6 m adâncime. La aceste neajunsuri se mai adaugă frigul cauzat de staționarea îndelungată a scafandrului în apă, care poate provoca accidente serioase.

O soluție destul de bună, constă în scoaterea rapidă a scafandrului din apă, presurizarea lui într-o barocameră la o adâncime corespunzătoare şi reluarea decompresiei în condiții de securitate şi confort sporit. Această soluție este lipsită de riscuri numai dacă manevra se face rapid.

Tabelele cu decompresie la suprafață, englezeşti, americane, ruseşti şi româneşti (elaborate de Laboratorul Hiperbar din Constanța) sunt derivate din tabelele de decompresie după scufundări cu aer, la care se aplică anumite reguli speciale. Acesta este motivul pentru care acest tip de tabele se foloseşte numai după scufundări cu aer. Tabelele englezeşti prevăd folosirea oxigenului pur încă de la palierul de 18 m. Celelalte tabele cu decompresia la suprafață recomandă utilizarea oxigenului pur după recompresia în barocamere. Cele mai sigure tabele cu decompresia la suprafață, recunoscute pe plan mondial, sunt cele americane. Aceste tabele prevăd scoaterea scafandrului la suprafață, după ce a efectuat palierul de la adâncimea de 9 m şi recomprimarea rapidă a acestuia, în mai puțin de 3 minute, la presiunea corespunzătoare adâncimii de 12 m în barocameră, unde respiră aer sau oxigen pur la o mască special amenajată, după care este readus direct la presiunea atmosferică. Acest palier singular de la adâncimea de 12 m, cu aer sau oxigen, este mai eficient decât palierele cu oxigen la adâncimi mici, pentru că viteza de difuzie a gazului inert din țesuturi este mai mare. O mărturie a recunoaşterii eficienței acestor tabele este faptul că acestea au fost acceptate în scufundările industriale, în special la lucrări sub apă în Marea Nordului.

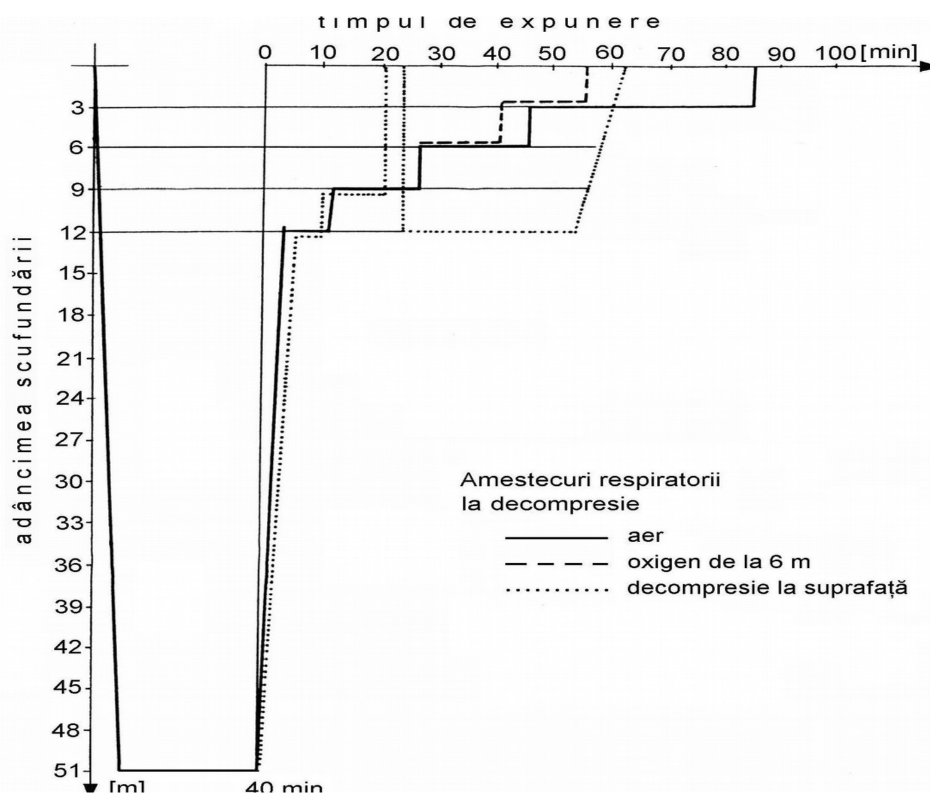


Fig. 5.26. Comparație între diferite procedee de decompresie după o scufundare la adâncimea de 51 m cu timp de expunere de 40 minute.

Tabelele cu decompresie la suprafață calculate şi testate la Laboratorul Hiperbar din Constanța, LH-89, au fost elaborate în anul 1989 şi pot fi considerate destul de sigure. Totuşi, a existat o oarecare reticență din partea scafandrilor în folosirea acestora datorită faptului că tehnologia trebuie foarte bine pregătită şi respectată cu multă exactitate. S-au efectuat 38 de scufundări la adâncimi cuprinse între 27 m şi 51 m, pentru timpul de expunere la presiunea corespunzătoare adâncimii de scufundare cuprins între 20 minute şi 40 minute, fără să se înregistreze accidente de decompresie. În figura 5.26 este prezentată o comparație între diferite procedee de decompresie. S-a luat, spre exemplificare, profilul decompresiei după o scufundare la adâncimea de 51 m, cu timp de expunere de 40 minute. Se constată că respirarea oxigenului pur sub apă reduce durata decompresiei cu aproape 50%, dar timpul de staționare în apă este totuşi mare, ceea ce face imposibilă realizarea acestei scufundări. Tabela cu decompresie la suprafață reduce, în mod substanțial, durata staționării în apă, ceea ce favorizează realizarea practică a scufundării.

5.3.4. DECOMPRESIA CONTINUĂ

Decompresia continuă este caracteristică pentru scufundările unitare la adâncimi de peste 120 m şi pentru scufundările în saturație. După ambele tipuri de scufundări, problema revenirii la presiunea atmosferică se pune aproximativ la fel, motiv pentru care, în cele ce urmează atenția va fi îndreptată asupra decompresiilor după scufundări în saturație. Se reaminteşte faptul că scufundarea în saturație este acea scufundare în care timpul de expunere a organismului uman la presiunea ambiantă este suficient de mare pentru ca toate țesuturile acestuia să se satureze în gazul sau gazele inerte din

amestecul respirator. În această situație, revenirea la presiunea atmosferică este dictată de țesutul cu perioada de semisaturație *H* cea mai mare.

Saturarea şi desaturarea țesuturilor umane sunt procese ce depind de natura gazului inert din amestecul respirator, considerând că restul variabilelor (presiune, temperatură şi chiar organism uman) rămân aceleaşi. În aceste condiții, se poate trata calculul decompresiei continue din punctul de vedere al celor două gaze inerte cel mai des utilizate în scufundări în saturație: heliul şi azotul.

Indiferent de natura gazului inert folosit ca diluant al oxigenului, decompresia după scufundări în saturație are două faze distincte: saltul şi decompresia lentă.

Saltul reprezintă o decompresie rapidă, în primii metri spre suprafață, cu viteza de 1 m/min. În legătură cu posibilitatea de utilizare a saltului, părerile sunt împărțite, în sensul că mulți cercetători consideră saltul o cauză a accidentelor de decompresie. Din experiența cercetătorilor din cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța, la scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii NITROX, saltul nu este o cauză a accidentelor de decompresie, ci dimpotrivă, facilitează decompresia în primul interval de adâncimi, prin stabilirea mai rapidă a gradientului de presiune maxim admisibil.

Decompresia lentă reprezintă acea parte a revenirii la presiunea atmosferică în care se adoptă condiția ca presiunea gazului inert dizolvat în compartimentul de țesuturi cu semiperioada de saturație cea mai lungă să nu fie mai mare decât cea admisibilă, materializată prin coeficientul de suprasaturație critic care defineşte viteza ce trebuie adoptată.

5.3.4.1. Calculul decompresiei după scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii HELIOX

Pentru a se putea calcula vitezele de revenire la presiunea atmosferică după o scufundare în saturație cu amestecuri respiratorii HELIOX, este necesar să se stabilească o serie de elemente prezentate în continuare.

a. Stabilirea compartimentului de țesuturi cu perioada de semisaturație cea mai lungă

În ceea ce priveşte heliul ca diluant al oxigenului în amestecurile respiratorii, părerile cercetătorilor din întrega lume sunt unanime, recunoscând compartimentele de țesuturi cu perioada de semisaturație de 240 minute şi 300 minute ca fiind compartimentele de țesuturi cu perioadele de semisaturație cele mai lungi. În calculul tabelelor de decompresie elaborate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța, s-a luat în considerare compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație de 300 minute.

b. Determinarea nivelului maxim al presiunii parțiale a oxigenului în amestecul respirator HELIOX

Este cunoscut faptul că, cu cât concentrația oxigenului din amestecul respirator este mai mare, cu atât durata decompresiei este mai mică, dar nu trebuie neglijat faptul că oxigenul este toxic şi toxicitatea lui este proporțională cu presiunea sa parțială şi cu timpul cât este inspirat.

În calculul timpului de revenire la presiunea atmosferică trebuie ținut cont de doza de toxicitate pulmonară a oxigenului (UPTD). Spre exemplu, pentru revenirea

după scufundări în saturație de la adâncimi de până la 300 m, se poate utiliza, fără risc, o presiune parțială a oxigenului în amestecul respirator de 0,6 bar (sc. abs.) [p_{O_2} =600 mbar(sc.abs.)]. La adâncimi de peste 300 m, de unde timpul de revenire la presiunea atmosferică depăşeşte 5 zile, presiunea parțială a oxigenului din amestecul respirator de 0,6 bar (sc. abs.) [p_{O_2} =600 mbar(sc.abs.)] nu mai poate fi folosită pe toată perioada decompresiei, urmând ca în prima parte a acesteia să se revină cu o presiune parțială a oxigenului de maxim 0,5 bar (sc. abs.) [p_{O_2} =500 mbar(sc.abs.)], presiune parțială tolerabilă timp îndelungat. Tabelele de decompresie după scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii HELIOX au fost elaborate de specialiştii Laboratorului Hiperbar din Constanța astfel încât, pentru fiecare tip de scufundare se poate determina, funcție de necesități, o tabelă de decompresie specifică, optimă.

c. Determinarea căderii de presiune admisibilă, tolerată de țesuturile organismului uman, la decompresie

În figura 5.27 este reprezentată *căderea de presiune admisibilă* funcție de presiunea la care este expus organismul uman pe timpul scufundărilor profunde.

Se remarcă faptul că există păreri diferite în ceea ce priveşte căderea de presiune admisibilă. Din aceste estimări, s-a determinat valoarea coeficientului de suprasaturație critic necesar pentru calculul tabelelor de decompresie. Coeficientul de suprasaturație critic C_{SC} reprezintă raportul dintre presiunea maximă a gazului inert dizolvat în compartimentul de țesuturi al modelului matematic folosit şi presiunea parțială a aceluiaşi gaz din amestecul respirator, care permite degazarea țesuturilor fără formare de bule.

În figura 5.28 este prezentată căderea de presiune admisibilă folosită de specialiştii Laboratorului Hiperbar din Constanța pentru determinarea coeficienților de suprasaturație critici C_{SC} ai compartimentului de țesuturi cu perioada de semisaturație de 300 minute. Din analiza rezultatelor obținute de cercetători din întrega lume, s-a observat că nu este vorba despre un coeficient de suprasaturație critic C_{SC} constant în raport cu presiunea la care este expus organismul pe timpul scufundării, ci de un coeficient ce variază cu presiunea. La adâncimi foarte mari, valoarea acestui coeficient se apropie de 1, iar spre suprafață (către presiunea atmosferică) se apropie de 3.

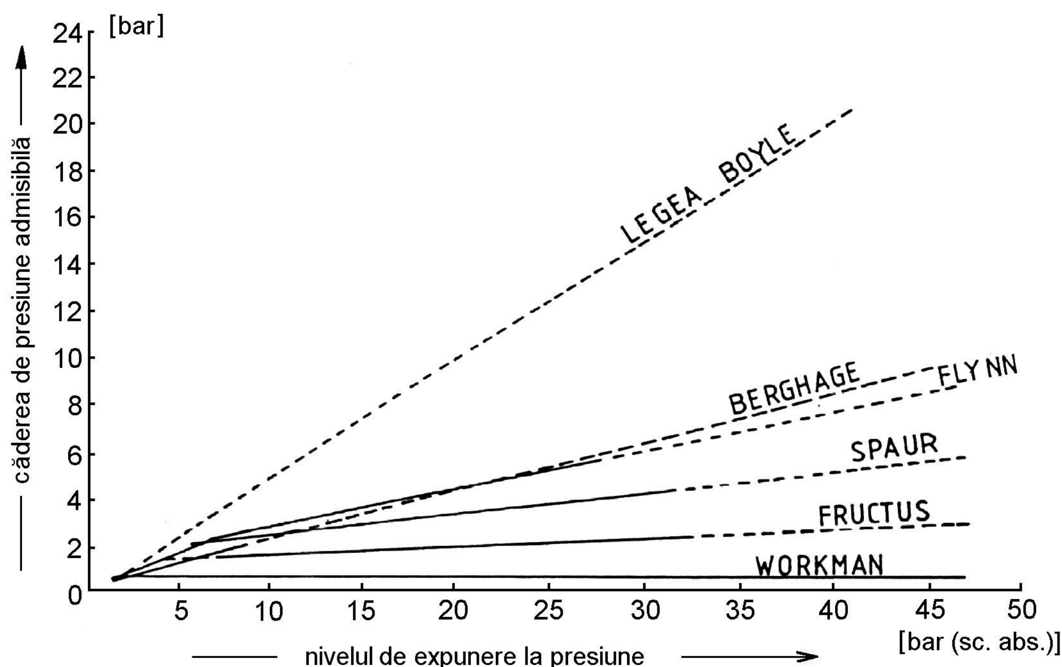


Fig. 5.27. Căderea de presiune admisibilă, estimată de diferiți cercetători, pentru organismul uman, funcție de presiunea la care este expus pe timpul scufundărilor. Linia continuă reprezintă datele actuale verificate, iar linia discontinuă reprezintă o extrapolare a datelor existente.

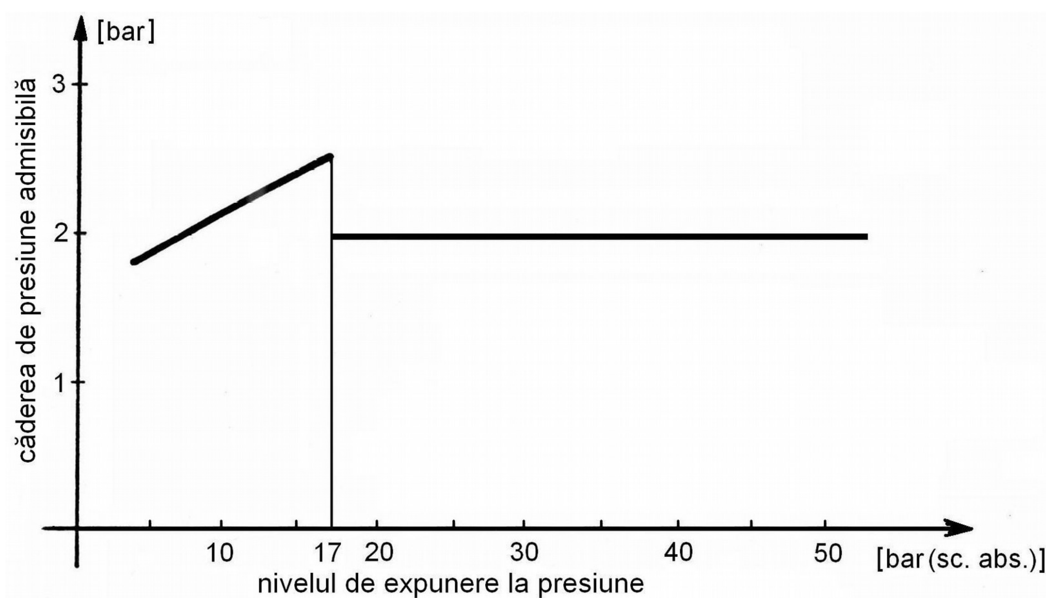


Fig. 5.28. Căderea de presiune admisibilă folosită de specialiştii Laboratorului Hiperbar din Constanța, funcție de presiunea la care este expus organismul uman în timpul scufundărilor.

Analizând graficul din figura 5.28, se remarcă faptul că apare un prag la nivelul presiunii de 17 bar (sc. abs.). Acest prag se datorează faptului că s-a ținut cont, la stabilirea căderii de presiune admisibile, de faptul că presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator scade prin creşterea presiunii parțiale a oxigenului de la 0,5 bar (sc. abs.) $[p_{O_2} = 500 \text{ mbar (sc.abs.)}]$ la 0,6 bar (sc. abs.) $[p_{O_2} = 600 \text{ mbar (sc.abs.)}]$.

Calculul tabelelor de decompresie după scufundări în saturație cu amestecuri HELIOX până la adâncimea de 500 m a fost efectuat după modelul "suprasaturație – – 300", unde cifra 300 reprezintă perioada de semisaturație a compartimentului de țesuturi considerat ca fiind compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație cea mai lungă. Cea mai apropiată abordare a decompresiei rămâne la presupunerea că, în transportul materiei prin mişcarea moleculară față de regiunile cu concentrații variabile, presiunea este dirijată de gradientul local. Pentru un corp uman uniform, aşa cum s-a arătat anterior, viteza de modificare a presiunii gazului este proporțională cu diferența dintre presiunea parțială a gazului inert inspirat p_i şi presiunea instantanee a gazului dizolvat p. Presupunând, la echilibru, presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator şi presiunea acestui gaz dizolvat în artere se obține:

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} = -\lambda(p - p_i), \tag{5-27}$$

unde λ este un coeficient caracteristic compartimentului de țesuturi cu perioada de semisaturație de 300 minute.

Integrând ecuația de mai sus şi luând la $t = 0$, $p = p_0$ se obține:

$$p - p_i = (p_0 - p_i)\exp(-\lambda t). \tag{5-28}$$

Pentru modelul "suprasaturație – 300", coeficientul caracteristic compartimentului de țesuturi luat în calculul tabelelor de decompresie este:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{H} = \frac{0,693}{300} = 2,3 \cdot 10^{-3}.$$

Valorile coeficienților de suprasaturație critici C_{SC} folosiți de specialiştii Laboratorului Hiperbar din Constanța pentru calculul decompresiei după scufundări în saturație cu amestec respirator HELIOX la adâncimea de 500 m, au variat între 1,04 şi 3. Variația acestora, funcție de adâncime, este prezentată în figura 5.29.

d. Stabilirea mărimii saltului la începutul decompresiei

Mărimea saltului la începutul decompresiei se stabileşte prin compararea presiunii maxime admisibile a gazului inert dizolvat în compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație de 300 minute cu presiunea parțială a aceluiaşi gaz din amestecul respirator ambiant. Saltul se poate executa până la adâncimea corespunzătoare unei presiuni admisibile a gazului inert dizolvat în compartimentul de țesuturi egală cu presiunea parțială a acestuia din amestecul respirator, dar numai la începutul decompresiei. Valoarea saltului este dată sub formă tabelară, funcție de presiunea ambiantă a nivelului de viață (presiunea de staționare în barocamere).

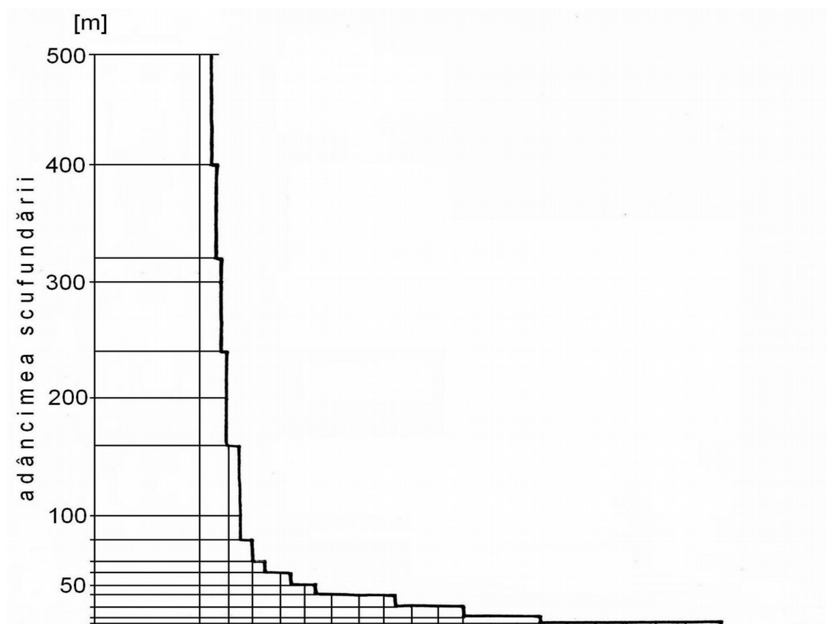


Fig. 5.29. Variația coeficientului de suprasaturație critic funcție de adâncimea scufundării. Aceste date au fost stabilite pentru calculul decompresiei după scufundări în saturație până la adâncimea de 500 m, cu amestecuri respiratorii HELIOX.

Aceste date fiind cunoscute, se poate trece la calculul tabelei de decompresie conform metodologiei prezentate pentru scufundările unitare autonome cu aer. Calculul se execută din metru în metru determinându-se, pe anumite intervale de adâncimi, o viteză medie de revenire la presiunea atmosferică.

În cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța (fig. 5.30) au fost efectuate în perioada analizată, 17 scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii HELIOX, ceea ce au reprezentat 68 de decompresii. Scufundările au fost executate după două tehnologii, una franceză pentru scufundări până la adâncimea de 300 m şi una românească pentru scufundări până la adâncimea de 500 m.



Fig. 5.30. Ansamblul de scufundare simulată aferent Laboratorului Hiperbar din Constanța.

Cu tehnologia franceză, în perioada analizată s-au efectuat 11 scufundări în urma cărora s-au realizat 44 de decompresii înregistrându-se 7 accidente de decompresie, ceea ce a reprezentat o incidență a accidentelor de 15,9%. Profilele acestor decompresii sunt prezentate în figura 5.31. Cea mai dificilă decompresie a fost

la scufundarea a 5-a efectuată la adâncimea de 200 m, la care s-au înregistrat dese accidente marcate prin recompresiile efectuate şi chiar un accident după revenirea la presiunea atmosferică, aceasta necesitând o recompresie la adâncimea de 18 m. Din teoria franceză asupra decompresiei după scufundări în saturaţie, acest ultim accident nu ar fi trebuit să fie posibil.

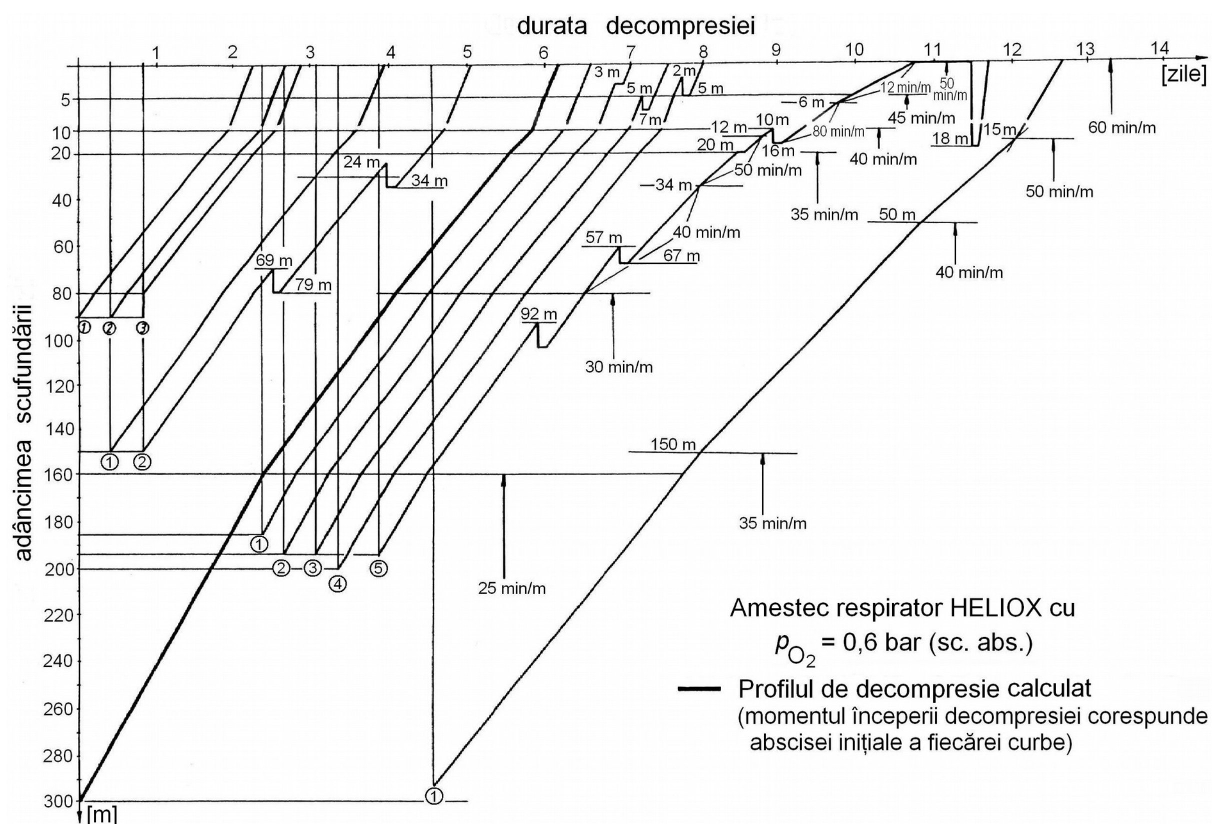


Fig. 5.31. Profile de decompresie executate în Laboratorul Hiperbar din Constanţa după tabele COMEX – Franţa.

Profilele decompresiilor executate după procedura calculată de specialiştii români din Laboratorul Hiperbar din Constanţa sunt prezentate în figura 5.32. Cu acest procedeu s-au executat 6 scufundări la care s-au efectuat 24 de decompresii, în fiecare scufundare fiind folosiţi câte 4 scafandri, înregistrându-se 3 accidente de decompresie, ceea ce a reprezentat o incidenţă a accidentelor de 12,5%. Toate aceste accidente au fost de tip B (bend), articulare, fiind tratate pe timpul decompresiei.

Pe timpul decompresiei după o scufundare în saturaţie la adâncimea de 200 m (fig. 5.33) şi după o scufundare la adâncimea de 300 m (fig. 5.34), s-au detectat bulele circulante de gaz inert din aparatul circulator. Detecţia s-a realizat cu ajutorul unui aparat cu ultrasunete bazat pe efectul Doppler.

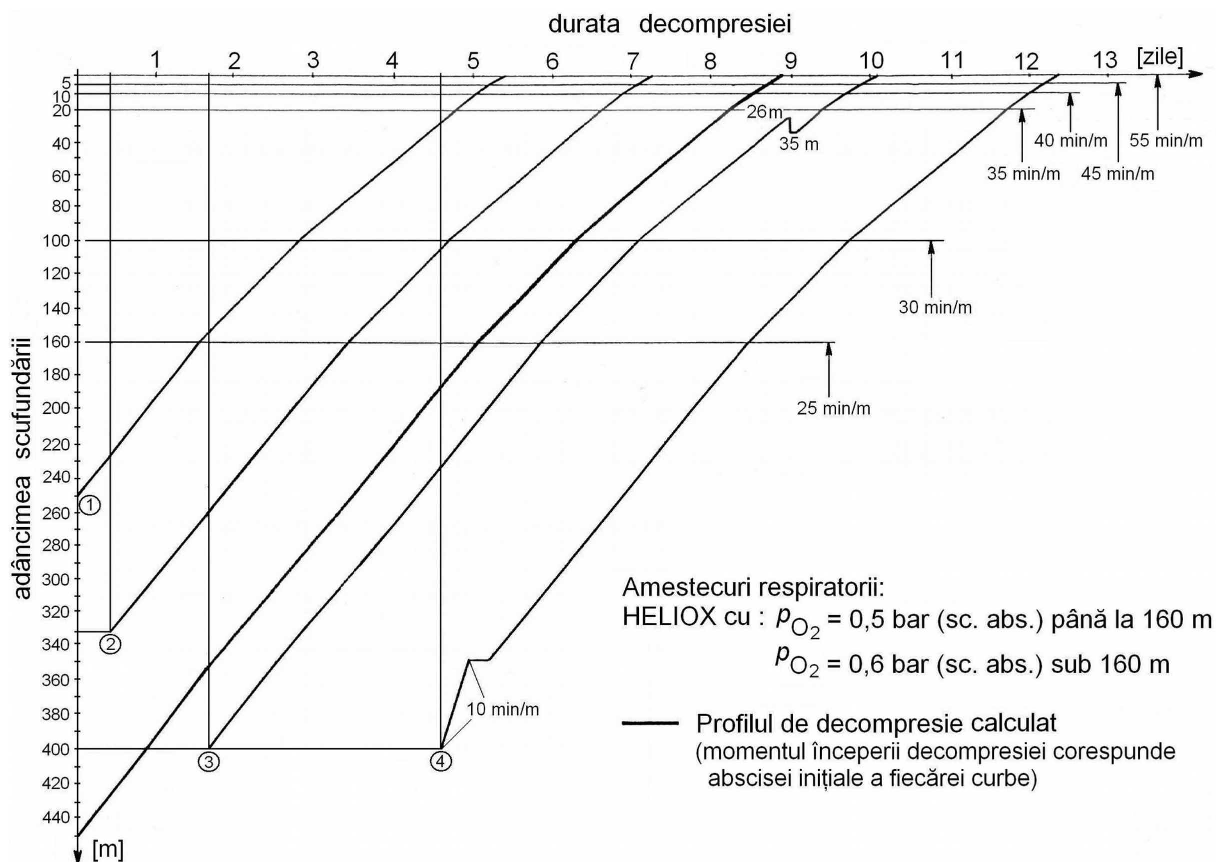


Fig. 5.32. Profile de decompresie executate în Laboratorul Hiperbar din Constanța după tabele originale.

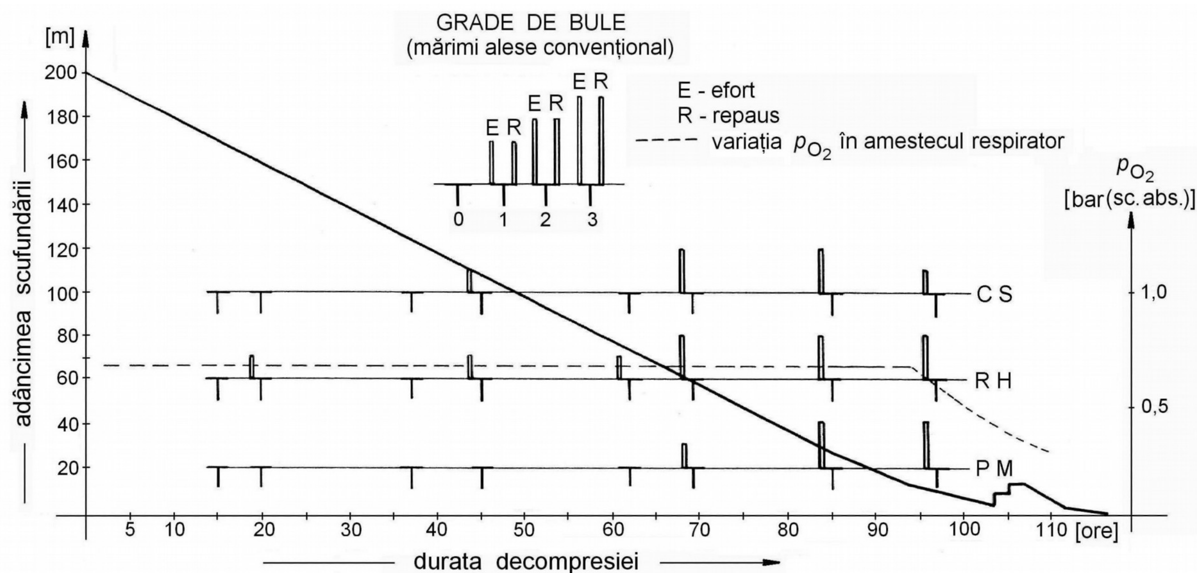


Fig. 5.33. Detecția de bule circulante pe timpul decompresiei după o scufundare în saturație la adâncimea de 200 m.

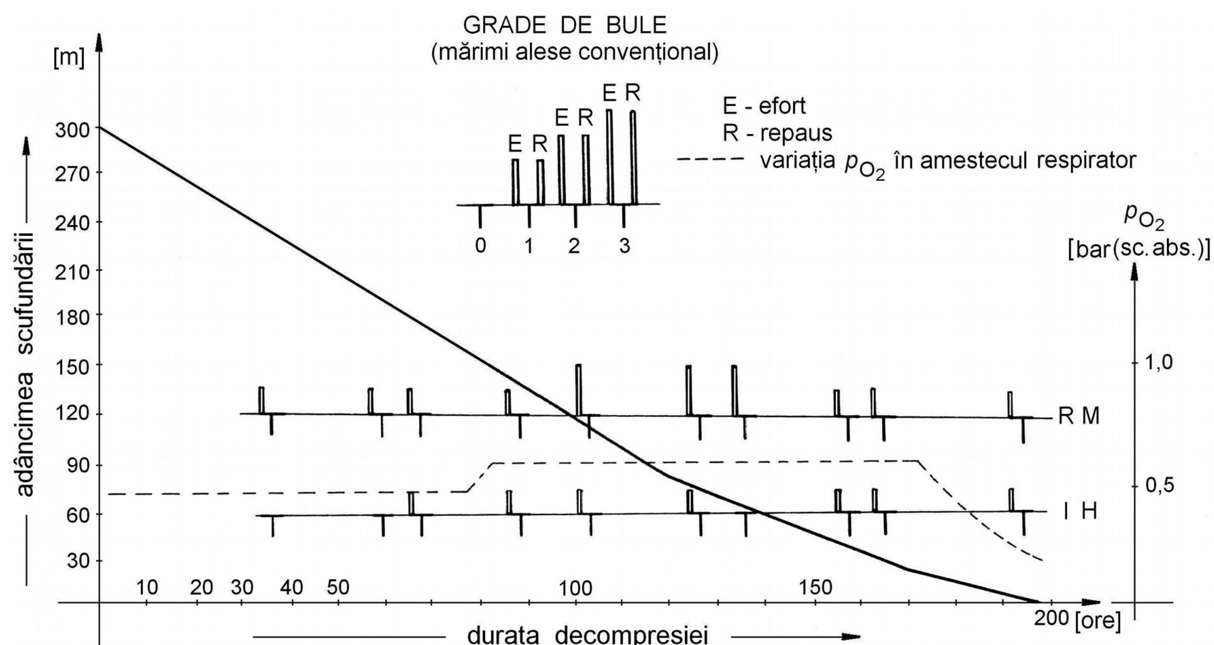


Fig. 5.34. Detecția de bule circulante pe timpul decompresiei după scufundare în saturație la adâncimea de 300 m.

Aparatul Doppler cuprinde, în principiu, trei elemente şi anume sonda ultrason cu o frecvență de 5 Mhz, un detector şi un sistem de ascultare şi înregistrare. Sonda este plasată în lungul marginii stângi a sternului, la nivelul celui de al treilea spațiu intercostal, ca în figura 5.35. Operatorul va dirija fascicolul de ultrasunete astfel încât să se elimine reflexiile pe zonele mobile ca pereții ventriculari şi zgomotele datorate efectelor de turbulență din curentul sanguin. Acest procedeu permite detectarea de bule cu un diametru de peste 50 microni.



Fig. 5.35. Controlul securității decompresiei prin detecția de bule efectuată de către un scafandru aflat într-o barocameră, pe perioada decompresiei.

Principiul de funcționare a aparatului Doppler (fig. 5.36) are la bază faptul că fascicolul de ultrasunete emis de sonda ultrason penetrează țesuturile. Dacă ultrasunetele nu întâlnesc o variație de mediu (bule de gaz în țesuturi sau în sânge), ele sunt deviate

sau chiar reflectate. Existența unei faze gazoase într-un țesut reprezintă o discontinuitate şi deci o variație brutală de mediu, ceea ce va conduce la o reflectare bună a ultrasunetelor. Se mai spune că o bulă reprezintă o variație brutală de impedanță. Ultrasunetele reprezintă o undă emisă cu o frecvență proprie. Dacă o undă se reflectă pe un obstacol aflat în mişcare, frecvența sa se modifică. Această modificare de frecvență este legată de viteza obstacolului. Deci, când lovesc o bulă de gaz, ca urmare a vitezei bulei, frecvența ultrasunetelor se modifică. Se compară deci semnalul emis şi semnalul primit şi decalajul în frecvență dă semnalul Doppler. Semnalul rezultat este în gama de frecvențe auzibile, urechea umană fiind un excelent mijloc de analiză şi deci un detector de bule.

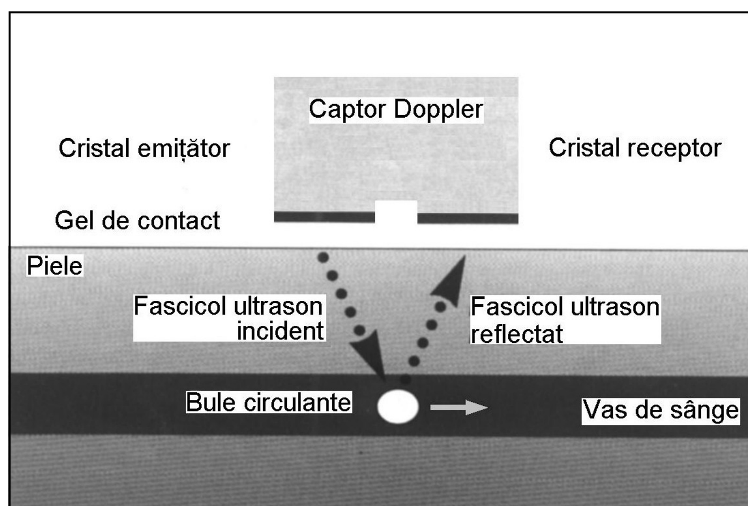


Fig. 5.36. Schema de principiu a funcționării aparatului Doppler pentru detecția de bule în circuitul sanguin.

Metoda de detecție a bulelor cu aparatul Doppler este standardizată, primirea de semnale făcându-se în general în repaus şi apoi la efort (trei flexări totale ale picioarelor). Semnalele, în banda auzibilă, pot fi înregistrate pe un magnetofon. După receptarea semnalelor acustice ale bulelor, se trece la clasarea lor după o scară. Pentru aceasta, se poate utiliza codul Spencer bazat pe frecvența de apariție a bulelor în raport cu sistolele. Astfel, gradul 0 reprezintă absența totală a semnalelor de bule, gradul 1 reprezintă apariția câtorva semnale de bule distanțate şi în cicluri cardiace întâmplătoare, gradul 2 corespunde semnalelor de bule izolate sau în grupuri în cel puțin jumătate din ciclurile cardiace, gradul 3 corespunde faptului că, practic, toate ciclurile cardiace conțin semnale de bule, dar care nu acoperă zgomotele normale ale inimii, iar gradul 4 este caracterizat printr-un flux continuu de semnale de bule acoperind zgomotele normale ale inimii.

Detecția de bule din curgerea bifazică pe timpul decompresiei după scufundările la adâncimile de 200 m şi 300 m, s-a executat de două ori pe zi (dimineața şi seara), în repaus şi după efort (2...3 genoflexiuni lente). Evoluția cantitativă a bulelor circulante din sânge s-a făcut în 4 grade, funcție de numărul de bule pe fiecare sistolă. Aproape toți scafandrii au avut unul sau două grade de bule circulante, dar numai în condiții de efort. Un singur scafandru a suferit un accident de decompresie ce a necesitat o recompresie terapeutică.

Pentru o comparare între tabela elaborată de specialiştii români şi o tabelă americană se exemplifică profilul decompresiilor după scufundări executate la aproximativ aceeaşi adâncime şi cu caracteristici similare. Este vorba despre scufundarea ATLANTIS I efectuată la Duke University Medical Center, Durham (fig. 5.37) şi scufundarea PONTUS IV efectuată la Laboratorul Hiperbar din Constanța. Profilele celor două decompresii sunt prezentate în figura 5.38.



Fig. 5.37. Laboratorul Hiperbar din Duke University Medical Center.

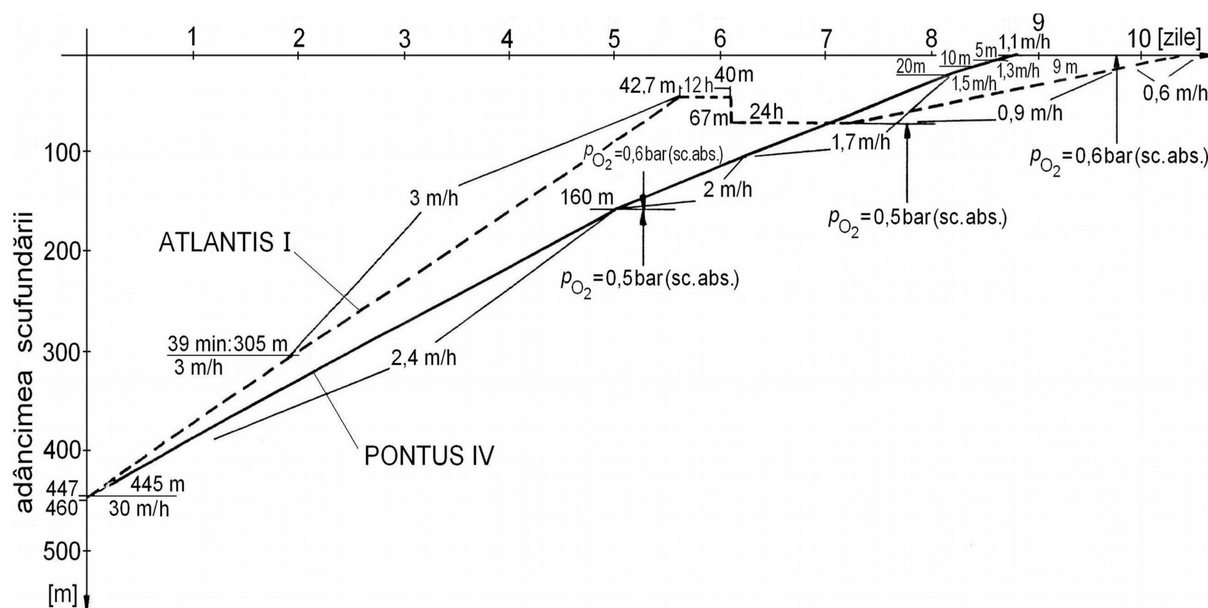


Fig. 5.38. Comparație între decompresiile executate în experiențele ATLANTIS I (Duke University Medical Center, Durham, S.U.A.) şi PONTUS IV (Laboratorul Hiperbar din Constanța).

Durata staționării la presiunea corespunzătoare adâncimii de 460 m, în scufundarea ATLANTIS I, a fost de 4 zile, fără alte variații de presiune. În cazul scufundării PONTUS IV, durata staționării la presiunea corespunzătoare adâncimii de 447 m a fost de 6 zile, timp în care au fost efectuate 3 intervenții sub apă la adâncimile de 450 m,

480 m şi 500 m. În acest ultim experiment, decompresia a început după 24 ore de la ultima intervenţie sub apă a scafandrilor.

Din analiza comparativă a celor două decompresii, se remarcă unele asemănări şi deosebiri:

– adâncimea de la care a pornit decompresia în experimentul ATLANTIS I a fost de 460 m, iar în experimentul PONTUS IV a fost de 447 m. Diferenţa dintre modul de lansare a decompresiei a constatat în faptul că în experimentul ATLATIS I aceasta a început cu un salt de 15 m cu viteza de 30 m/h. Decompresia în experimentul PONTUS IV a început fără salt;

– amestecul respirator utilizat a fost amestec HELIOX cu 5% azot în experimentul ATLANTIS I şi cu 4% azot în experimentul PONTUS IV. Presiunea parţială a oxigenului la decompresie a fost p_{O_2} =0,5 bar (sc. abs.) [p_{O_2} =500 mbar (sc. abs.)] până la adâncimea de 67 m pentru experimentul ATLANTIS I şi până la adâncimea de 160 m pentru experimentul PONTUS IV, după care amestecul respirator a fost îmbogăţit în oxigen, până la presiunea parţială a oxigenului p_{O_2} =0,6 bar (sc. abs.) [p_{O_2} =600 mbar (sc. abs.)];

– vitezele de decompresie în experimentul ATLANTIS I au fost mai ridicate în prima parte a decompresiei (3 m/h) şi mai mici după adâncimea de 67 m (0,9...0,6 m/h), în timp ce în experimentul PONTUS IV variaţia vitezelor a fost în limite mai restrânse (2,4...1,1 m/h);

– pe timpul decompresiei, calculată după metoda specialiştilor americani, a avut loc un accident de decompresie la adâncimea de 42,7 m ce a necesitat un palier de 12 ore. Continuarea decompresiei a eşuat fiind nevoie să se execute o recompresie pentru tratarea accidentatului, de la 40 m la 67 m adâncime, urmată de o staţionare de 24 ore, ca apoi decompresia să fie reluată cu viteze mai mici şi cu o presiune parţială a oxigenului crescută [p_{0_2} =0,6 bar (sc. abs.) = 600 mbar (sc. abs.)]. De altfel, în următoarele experimente efectuate de specialiştii americani, deşi au redus vitezele de decompresie, au avut loc, totuşi, accidente destul de grave. În experimentul ATLANTIS II vitezele de decompresie au fost în limitele 2,5 m/h la 0,6 m/h, dar decompresia a început de la adâncimea de 650 m, înregistrându-se două accidente, unul la 466 m şi altul la 45 m adâncime. În experimentul ATLANTIS III, efectuat la adâncimea de 686 m, vitezele de decompresie au fost mai mici, variind între 1,2 m/h şi 0,5 m/h, înregistrându-se un accident de decompresie la adâncimea de 526 m. Decompresia calculată de specialiştii români a fost continuă şi sigură;

– durata totală a decompresiei după experimentul PONTUS IV a fost cu aproximativ 40 ore mai mică decât durata decompresiei după experimentul ATLANTIS I.

Din analiza celor două decompresii (fig. 5.38), se desprinde faptul că metoda de calcul elaborată de specialiştii români este mai bună. Schimbarea presiunii parţiale a oxigenului la adâncimea de 160 m (mai repede decât în metoda americană) creează posibilitatea menţinerii unei viteze de decompresie mai ridicate şi facilitează eliminarea gazului inert din ţesuturi, fără afectarea aparatului respirator (efectul Lorrain-Smith). Cele patru scufundări însumând 16 decompresii, executate după scufundări la peste 300 m adâncime în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanţa, au demonstrat valabilitatea modelului matematic utilizat în calcul. A fost înregistrat un singur accident de decompresie, ce a necesitat recompresie, de altfel minor, ceea ce a însemnat o incidenţă a accidentelor de 6,25%.

5.3.4.2. Calculul decompresiei după scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii NITROX

Calculul tabelelor de decompresie după scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii NITROX este similar calculului tabelelor pentru amestecuri respiratorii HELIOX, cu deosebiri în ceea ce priveşte stabilirea a două elemente prezentate în continuare.

a. Stabilirea compartimentului de țesuturi cu perioada de semisaturație cea mai lungă

Dacă în cazul utilizării heliului părerile specialiştilor sunt unanime, în cazul utilizării azotului ca diluant al oxigenului în amestecurile respiratorii, există diferențe notabile de păreri de la o şcoală la alta. În cele ce urmează se vor prezenta câteva păreri, în acest sens, ale şcolilor de scufundare elvețiană, americană şi chineză, precum şi contribuția specialiştilor de la Laboratorul Hiperbar din Constanța la îmbunătățirea calculului acestor tabele.

Profesorul dr. A. A. Bühlmann de la Laboratorul Hiperbar al Clinicii Medicale din Zürich a plecat de la ideea că saturarea şi desaturarea gazului inert în şi respectiv din țesuturi sunt funcție de greutatea moleculară a acestuia, mai exact, conform legii lui Graham, difuzia unui gaz între o fază gazoasă şi una lichidă este invers proporțională cu rădăcina pătrată a masei moleculare relative a gazului respectiv. Astfel, se poate scrie:

$$v_{d,gi} = \frac{1}{\sqrt{G_M}} F , \qquad (5\text{-}29)$$

unde $v_{d,gi}$ este viteza de difuzie a gazului inert;
G_M – masa moleculară relativă a gazului inert;
F – o funcție dependentă de natura țesuturilor organismului uman în care difuzează gazul inert.

Pentru heliu şi azot se vor obține:

$$v_{\mathrm{d,He}} = \frac{1}{\sqrt{4}} F = 0,5\ F ; \qquad v_{\mathrm{d,N_2}} = \frac{1}{\sqrt{28}} F = 0,18898\ F .$$

Dacă se face raportul între cele două viteze de difuzie se obține $v_{\mathrm{d,He}} / v_{\mathrm{d,N_2}} = 2,65$, care este raportul găsit de Bühlmann pentru caracterizarea celor două gaze inerte. Cu alte cuvinte, saturarea şi desaturarea țesuturilor organismului uman cu heliu se fac de 2,65 ori mai rapid decât cu azot. Astfel, A. A. Bühlmann a stabilit 16 perechi de compartimente de țesuturi pentru perioadele de semisaturație cu gazele inerte heliu şi azot, din care se amintesc numai cele ce interesează decompresia după scufundări în saturație: pentru compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație $H = 240$ minute, în cazul în care se respiră amestec HELIOX, corespunde un compartiment de țesuturi cu perioada de semisaturație $H = 636$ minute pentru amestec NITROX, iar pentru compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație $H = 300$ minute pentru amestec HELIOX ar corespunde un compartiment de țesuturi cu perioada de semisaturație $H = 795$ minute pentru amestec NITROX. Pentru amestecuri NITROX, A. A. Bühlmann consideră compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație $H = 636$ minute, ca fiind țesutul cu perioada de semisaturație cea mai lungă.

Pentru exemplificare, se prezintă experimentările făcute de către Institutul de Cercetări pentru Tehnologii Subacvatice din Shanghai în perioada 1977–1979. La Shanghai s-au efectuat 9 scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii NITROX la adâncimi cuprinse între 20 m şi 50 m, folosindu-se 54 scafandri, scufundări ale căror caracteristici şi profile de decompresie sunt prezentate în tabelul 5.19 şi respectiv în figura 5.39.

Tabelul 5.19

Caracteristicile scufundărilor în saturație cu amestecuri respiratorii NITROX efectuate la Institutul de Cercetări pentru Tehnologii Subacvatice din Shanghai

Nr. exp.	Adâncime [m]	Durata [zile]	Decompresie [h.min]	Respirare O_2 [h.min]	Număr accidente	Tip decompresie
1	20	10	43.31	6.26	–	în trepte
2	30,5	7	70.45	7.30	–	în trepte
3	30,5	8	72.03	7.00	–	în trepte
4	30,5	9	70.50	7.00	–	în trepte
5	30,5	6	67.13	6.40	–	în trepte
6	36,5	9	79.03	9.33	–	în trepte
7	36,5	26	95.54	10.25	–	continuă
8	50	5	171.30	12.30	1	continuă
9	36,5	6,5	89.47	10.47	–	în trepte

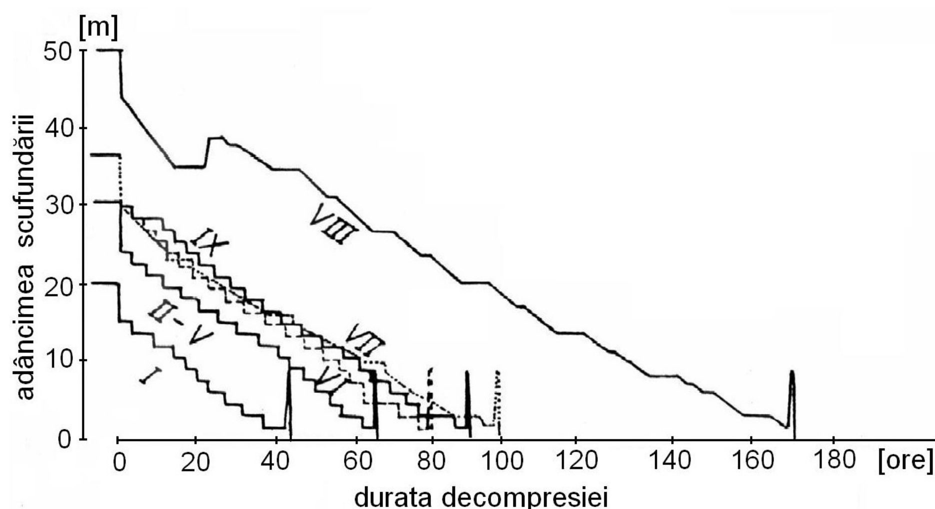


Fig. 5.39. Profilele procedeelor de decompresie după scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii NITROX executate la Institutul de Cercetări pentru Tehnologii Subacvatice din Shanghai.

Decompresiile I, II, III, IV şi V au fost efectuate după tabela de scufundare **N.O.A.A.** (**N**ational **O**ceanic and **A**tmospheric **A**dministration). Decompresiile VII şi VIII au fost efectuate după concepția institutului de specialitate din Shanghai. Calculul tabelelor de decompresie a avut la bază teoria lui Workman. Deşi la experimentele făcute în alte țări, compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație cea mai lungă a fost cel cu perioada de semisaturație $H = 675$ minute, şcoala din Shanghai a preferat,

pentru o securitate deplină, compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație $H = 1200$ minute. Legat de stabilirea compartimentului de țesuturi cu perioada de semisaturație cea mai lungă, în cazul utilizării amestecurilor respiratorii NITROX, specialiştii Laboratorului Hiperbar din Constanța au plecat de la ideea că viteza de difuzie a gazului inert între o fază gazoasă şi o fază lichidă se supune şi legii lui Henry care arată că viteza de difuzie este direct proporțională cu solubilitatea gazului inert. În acest caz se poate scrie relația:

$$v_{d,gi} = \frac{\Sigma}{\sqrt{G_M}} F , \qquad (5\text{-}30)$$

unde Σ este solubilitatea gazului inert în apă.

Pentru heliu şi azot se obțin expresiile:

$$v_{\mathrm{d,He}} = \frac{0,009}{\sqrt{4}} F = 4,5 \cdot 10^{-3} F ; \qquad v_{\mathrm{d,N_2}} = \frac{0,015}{\sqrt{28}} F = 2,834 \cdot 10^{-3} F .$$

Făcând raportul între cele două viteze de difuzie se obține $v_{\mathrm{d,He}} / v_{\mathrm{d,N_2}} = 1,6$, care este raportul folosit de specialiştii români pentru caracterizarea celor două gaze inerte. Cu alte cuvinte, saturarea şi desaturarea țesuturilor organismului uman cu heliu se fac de 1,6 ori mai rapid decât cu azot. Astfel, specialiştii români au stabilit următoarele perechi de compartimente de țesuturi pentru perioadele de semisaturație cu heliu şi azot, specifice decompresiilor după scufundări în saturație: pentru compartimentul de țesuturi cu perioada de semisturație $H = 240$ minute în cazul când se respiră un amestec HELIOX corespunde un compartiment de țesuturi cu perioada de semisaturație $H =$ 384 minute pentru amestec NITROX, iar pentru compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație $H = 300$ minute pentru amestec respirator HELIOX ar corespunde un compartiment de țesuturi cu perioada de semisaturație $H = 480$ minute pentru amestec NITROX.

Plecând de la aceste date, specialiştii români au elaborat primele tabele de decompresie după scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii NITROX după modelul matematic "saturație – NITROX – 400". După acest model au fost efectuate scufundări cu animale (cobai) şi 8 scufundări, totalizând 32 de decompresii, cu subiecți umani, înregistrându-se 4 accidente de scufundare, ceea ce a reprezentat o incidență a accidentelor de 12,5%. Profilele acestor decompresii sunt reprezentate în figura 5.40. Ca urmare a unui accident destul de grav, de tip V (vestibular) combinat cu accident de tip N (neurologic), în scufundarea a 8-a, s-au recalculat tabelele de decompresie după modelul matematic "saturație – NITROX – 480", în care compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație cea mai mare a fost ales cel cu perioada de semisaturație $H = 480$ minute. Cu acest procedeu au fost efectuate 6 scufundări (24 decompresii) din care 4 scufundări (16 decompresii) în condiții de laborator şi 2 scufundări (8 decompresii) în condiții reale, în mare. Profilele acestor decompresii sunt reprezentate în figura 5.41. La toate aceste scufundări nu s-au mai înregistrat accidente de decompresie, ceea ce a permis afirmația că această ultimă soluție este foarte aproape

de cerințele unei tehnologii reale de lucru sub apă în scufundări în saturație cu amestecuri NITROX.

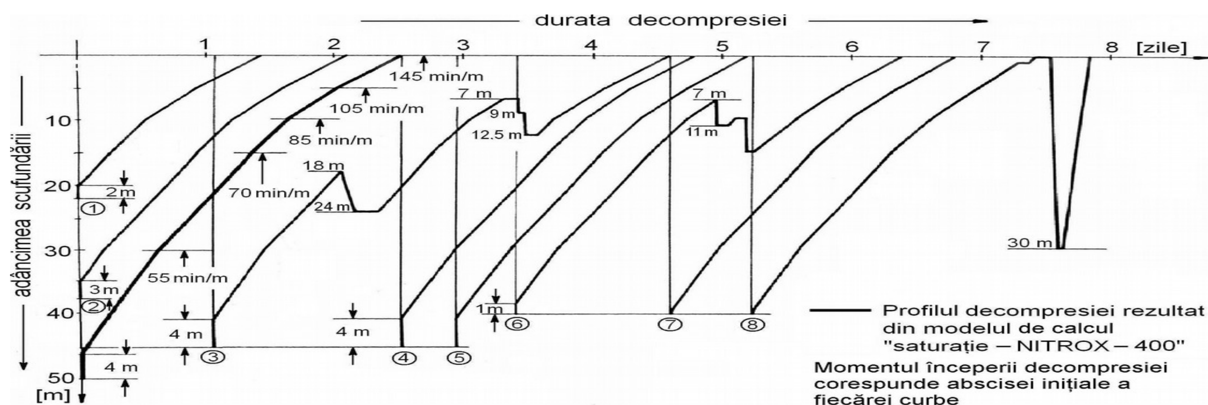


Fig. 5.40. Profile de decompresie executate în Laboratorul Hiperbar din Constanța după tabelele originale, utilizând modelul "saturație – NITROX – 400".

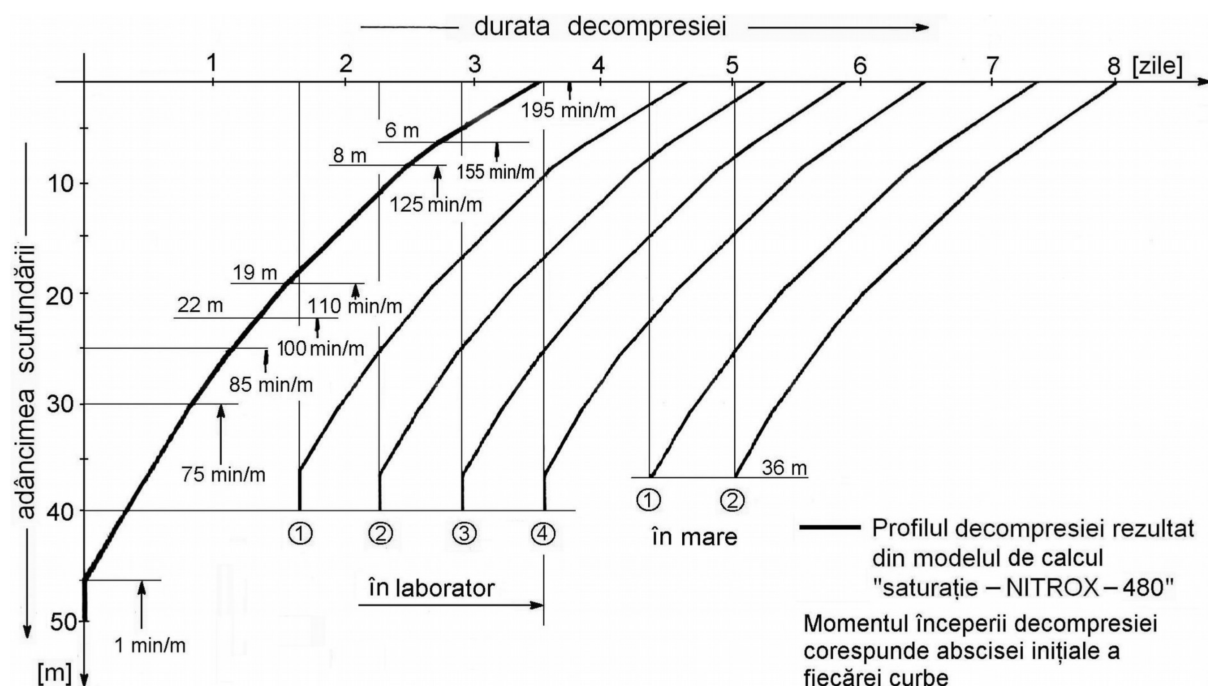


Fig. 5.41. Profile de decompresie executate în Laboratorul Hiperbar din Constanța după tabelele originale, utilizând modelul "saturație – NITROX – 480".

Cercetările efectuate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanța nu s-au oprit aici. În figura 5.42 sunt prezentate, pentru comparație, câteva procedee de revenire la presiunea atmosferică după scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii NITROX. Trebuie remarcată scufundarea la adâncimea de 40 m cu revenirea la presiunea atmosferică în aproximativ 32 ore, cea mai rapidă decompresie realizată. Cu această ocazie s-a verificat ipoteza lui Jones, care afirmă că perioadele de semisaturație sunt aceleaşi indiferent de natura gazului inert. De fapt, problema trebuie discutată în

corelație cu coeficientul de semisaturație critic, coeficient care nu poate fi acelaşi în condițiile în care se consideră gazele inerte cu comportări similare sau apropiate. După părerea specialiştilor români, în calculul procedeului de decompresie nu se poate separa conceptul de perioadă de semisaturație de conceptul de coeficient de suprasaturație critic. Dacă s-ar considera că gazele inerte au aceeaşi perioadă de semisaturație, deoarece desaturarea este un fenomen invers, s-ar putea concluziona că, indiferent de natura gazului inert din amestecul respirator, revenirea la presiunea atmosferică ar fi identică, ceea ce nu este adevărat.

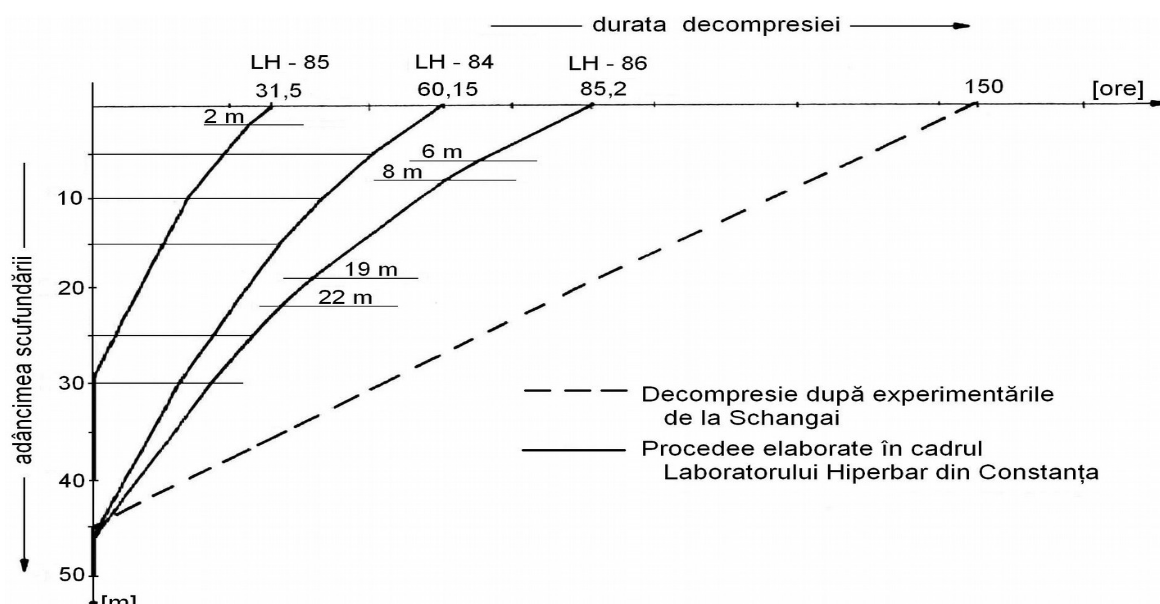


Fig. 5.42. Comparație între procedee de decompresie după scufundări în saturație cu amestecuri NITROX.

Din figura 5.42 se observă marea diferență dintre tehnologiile folosite de Institutul de Cercetări pentru Tehnologii Subacvatice din Shanghai şi cele elaborate la Laboratorul Hiperbar din Constanța. După părerea specialiştilor români, durata mare a decompresiei nu justifică respirarea oxigenului pur pe ultimii metri ai acesteia. O altă măsură suplimentară (fig. 5.39) a constat în recompresia din finalul decompresiei la adâncimea de 12 m şi revenirea la presiunea atmosferică respirându-se oxigen pur. Această măsură a fost motivată pentru creşterea gradientului de presiune dintre presiunea azotului dizolvat în țesuturi şi presiunea parțială a aceluiaşi gaz din amestecul respirator (egalată cu zero), pentru o accelerare a desaturării țesuturilor. Acest tip de tehnologie este greoaie şi dă un oarecare disconfort utilizatorilor, nefiind confirmată de modelul matematic elaborat de specialiştii români.

b. Determinarea valorii coeficientului de suprasaturație critic în cazul decompresiilor după scufundări în saturație cu amestecuri respiratorii NITROX

Pentru calculul tabelelor de decompresie după scufundările în saturație cu NITROX efectuate la Institutul de Cercetări pentru Tehnologii Subacvatice din Shanghai, s-a aplicat conceptul diferenței de presiune al lui Workman. Pentru compartimentele de țesuturi cu perioada de semisaturație de H =670...1200 minute,

valoarea diferenței de presiune maximă admisibilă a presiunii azotului dizolvat a fost de 0,45 bar.

Pentru calculul decompresiei după scufundările în saturație cu amestecuri NITROX, specialiştii români au folosit conceptul de coeficient de suprasaturație critic C_{SC}. Pentru modelul matematic "saturație – NITROX – 400", coeficientul folosit a fost C_{SC} =1,2, ceea ce a corespuns unei diferențe de presiune admisibilă variabilă, de la 0,98 bar corespunzătoare adâncimii de 45 m [5,5 bar (sc. abs.)] la 0,16 bar în momentul revenirii la presiunea atmosferică. Variația diferenței de presiune este liniară. Deoarece acest model matematic nu a corespuns din punct de vedere al securității decompresiei, specialiştii români au refăcut calculele cu un nou model "saturație – NITROX – 480" la care coeficientul de suprasaturație critic a fost C_{SC} =1,1, ceea ce a corespuns unei diferențe de presiune admisibilă variabilă, de la 0,74 bar corespunzătoare adâncimii de 45 m [5,5 bar (sc. abs.)] la 0,10 bar în momentul revenirii la presiunea atmosferică. Acest ultim model matematic şi-a dovedit valabilitatea atât pe timpul experimentărilor efectuate în laborator cât şi pe timpul scufundărilor reale, operaționale, executate în mare, neînregistrându-se accidente de decompresie.

Elaborarea de procedee de pătrundere sub apă şi de revenire la presiunea atmosferică, rezolvă doar parțial problemele din cadrul tehnologiilor lucrărilor subacvatice. Pentru a se completa tehnologiile, trebuie să se stabilească şi mijloacele cu care se pot executa scufundări operaționale, care să permită pătrunderea omului sub apă la diferite adâncimi astfel încât să poată executa, în mod eficient, lucrările pentru care a fost trimis pe şantierul subacvatic şi care să-i asigure o revenire la presiunea atmosferică în condiții de securitate.

BIBLIOGRAFIE

BADIU, G., ILIESCU, C., PETRU, A. – *Dynamic study of postural tremor in high pressure conditions.* Roumanian Journal of Physiology, Vol. 28, nr. 3-4, pp. 83-87, Bucureşti, 1991.

BENNETT, P.B. – *Atlantis III, an experimental deep dive to 686 m using TRIMIX 10.* Medicine Subaquatique et Hyperbare, vol. XX, nr. 80, pp. 320-322, 1981.

BERRY, Y., GAVARRY, P., HUBERT, J.P., LE CHUITON, J., PARC, J. – *La plongée et l'intervention sous la mer*. Ed. Arthaud, Paris, 1977.

BÜHLMANN, A.A. – *Decompression. Decompression sickeness*. Springer Verlag, pp. 4-62, Berlin, 1984.

BÜHLMANN, A.A. – *Untersuchungen zur Dekompresssion bei enniedrigtem Luftdruck*. Schweizerische Medizinische Wochenschrift, nr. 114, 1984.

CONSTANTIN, A. – *Transportul gazelor prin sistemul respirator uman şi mijloacele de protecţia respiraţiei, în procese hiperbare.* Teză de doctorat, Universitatea "Ovidius" Constanţa, 1998.

DEGERATU, M., PETRU, A., BEIU, V. – *Computer – aided Simulation of Theoretical Processes in Binary and Ternary Mixtures of Hyperbaric Systems Used in Deep Diving.* Chemical Abstracts, page 346, 9-Biochem. Methods, vol. 107, Columbus, Ohio, U.S.A., 1986.

DEGERATU, M. – *Modelarea matematică a fenomenelor gazodinamice specifice unui sistem cu injecţie la debit masic constant pentru amestecuri respiratorii binare*. A II-a Sesiune de Comunicări ştiinţifice cu tema Inginerie, tehnologie şi medicină subacvatică, Centrul de Scafandri, Constanţa, 1988.

DEGERATU, M. – *Simularea teoretică a funcţionării aparatului de scufundare ASMA cu amestec Heliu-Oxigen.* A IV-a Sesiune de Comunicări Ştiinţifice cu tema Inginerie, tehnologie şi medicină subacvatică, Centrul de Scafandri, Constanţa, 1989.

DEGERATU, M., PETRU, A., IONIŢĂ, S. – *Manualul scafandrului*. Ed. Per Omnes Artes, Bucureşti, 1999.

DEGERATU, M., PETRU, A., GEORGESCU, Şt. – *Aparate de respirat sub apă*. Ed. MATRIX ROM, Bucureşti, 2003.

DINU, D., PÎNZARU, M., STANCU, C., VLAD, C. – *Tehnologii subacvatice. Autorizarea activităţilor subacvatice*. Ed. Tehnică, Bucureşti, 2000.

FRUCTUS, X. – *HYDRA V: un succes au-dela des previsions.* Rev. Oceans nr. 144, pp. 46-48, 1985.

FRUCTUS, X., SCIARLI, R.L. – *La plongée santé et securité*. Editions Maritimes et d'Outre-Mer, Paris, 1980.

GARDETTE, B. – *HYDRA IV and HYDRA V, human deep hydrogen dives 1983-1985. In hydrogen as a diving gas*. 33-rd Under sea and Hyperbare Medical Society Workshop. Ed. BRAUER R. W., 1987.

HALDANE, J.S., PRIESTLEY, J.G. – *Respiration*. 2nd ed. New Haven, Yale University Press, 1935.

HAUX, G. – *Tauchtechnik. Band I.* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1969.

HEMPLEMAN, H.V., GARRARD, J.T., HARRIS, D.J., HAYES, P.A., HENNESSY, T.Y., NICHOLS, G., TOROK, Z., WINSBOROUGH, M.N. – *U.K. deep diving trials.* Phil. Trans. R. Soc. London, B304, pp. 119-141, London, 1984.

JONES, H.S. – *Respiration System: Nitrogen Elimination*. Medical Physics, vol. II, Chicago Year Book Publishers, 1950.

LAMBERTSEN, C.J. – *Effects of Excesive Pressure of Oxygen, Nitrogen, Helium, Carbon Dioxide and Carbon Monoxide.* Medical Physiology. Ed. V.B. Mountcastle, vol. II, 1980.

LAMBERTSEN, C.J. – *Prediction of physiological limits to human undersea activity and extension of tolerance to high pressure*. Adv. Physiol. Sci., vol. 18, Environmental Physiology, pp 143-164, 1981.

LEMAIRE, C. – *Utilisation de l'oxigen en plongée.* C.E.H. COMEX, Marseille, 1977.

PASTUCH, C.O. – *Testarea solicitării funcției respiratorii şi circulatorii în cursul adaptării şi muncii în mediul hiperbar*. Teză de doctorat, Institutul de Medicină şi Farmacie Cluj-Napoca, 1987.

PETRU, A. – *Amestecuri respiratorii.* Buletinul Tehnica Militară, nr. 3-4 , Bucureşti, 1987.

PETRU, A. – *Aparate autonome de respirat sub apă.* Buletinul Marinei Militare, nr. 2, Constanța, 1985.

PETRU, A. – *Aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis.* Buletinul Tehnica Militară, nr. 4, Bucureşti, 1989.

PETRU, A. – *Hidraulica proceselor hiperbare*. Teză de doctorat, Universitatea Tehnică de Construcții Bucureşti, 1993.

PETRU, A., BADIU, G. – *Considerațiuni fiziologice privind tremorul în hiperbarism*. Conferința națională de Fiziologie, pp. 76-77, Constanța. 1991.

POULET, G., BARINCOU, R. – *La plongée*. Ed. Denöel, Paris, 1988.

VANN, R.D. – *Decompression theory and applications. The Physiology and Medicine of Diving.* 3-th edition. Ed. P.B. BENNETT & D.H. ELLIOT, pp. 353-380, London, 1982.

WORKMAN, R.D. – *Calculation of decompression schedule for nitrogen-oxigen and helium-oxygen dives*. Report 6-65 US Navy Experimental Diving Unit, Washington D.C., 1965.

* * * – *Linde Gasekatalog.* Linde AG, Werksgruppe Technische Gase, München.

* * * – *U.S. Navy Diving Manual*. U. S. Government Printing Office, Washington, 1975.

* * * – *The NOAA Diving Manual – Diving for Science and Tehnology.* U.S. Government Printing Office, Washington, 1975.